



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**MOŽNOSTI REPLIKACE ROZSTŘIKOVACÍCH TRYSEK
METODOU 3D TISKU**

POSSIBILITIES FOR REPLICATION OF SPRAYING NOZZLES BY MEANS OF 3D PRINTING METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Petrenec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jan Petrenec**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti replikace rozstřikovacích trysek metodou 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Klasická výroba trysek obráběním je poměrně nákladná finančně i časově a dnes se nabízí její náhrada metodami 3D tisku. Otázkou je, zda některá z mnoha současných technologií 3D tisku již poskytuje řešení, které by mohlo konkurovat výsledkům získaným obráběním a postačovat pro správnou funkci trysky. Rozstřikovací trysky jsou tvarově složité soustavy dílů s požadovanou vysokou kvalitou povrchu a rozměrovou i tvarovou přesností, musí snést určité mechanické namáhání i abrazi kapalinou a jsou na ni kladeny případně i další požadavky. Práce bude zaměřena na podrobnou rešerši dostupných metod 3D tisku, jejich možnosti s ohledem na dané téma a již realizovaná řešení. Bude zvolena jedna z dostupných metod, tryška navržena a případně i vyrobena a vyzkoušena.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše dostupných metod 3D tisku se zaměřením na jejich možnosti a již realizovaná řešení v oblasti replikace rozstřikovacích trysek,
2. Popis funkce konkrétního typu rozstřikovací trysky, rešerše k vlivu kvality povrchu, rozměrové a tvarové přesnosti na její funkčnost
3. Specifikace požadavků kladených na uvedenou trysku s upřesněním pro konkrétní aplikaci (např. vysoká kvalita povrchu, rozměrová a tvarová přesnost, stálost, ořezuvzdornost, pevnost)
4. Kritické posouzení metod popsanych v bodu 1 s ohledem na body 2 a 3, odhad míry splnit požadavky a případně diskuse možností kombinace 3D tisku a jiných technologií pro úspěšné řešení
5. Výběr nejperspektivnější z dostupných metod a příprava dokumentace trysky pro její výrobu technologií 3D tisku
6. Výroba, sestavení a vyzkoušení trysky, porovnání se shodnou tryskou vyrobenou klasickou technologií (tento bod je nepovinný, bude řešen dle časových možností a výsledku předchozích bodů)

Seznam doporučené literatury:

FRANCE, Anna Kaziunas. Make: 3D printing. Sebastopol, CA: Maker Media, 2013. ISBN 978-1457182938.

GEARY, Jeff. 3D printing & laser cutting: a railway modelling companion. Addlestone: Ian Allan Publishing, 2016. ISBN 9780711038417.

CHUA, Chee Kai. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fifth edition of Rapid prototyping. World Scientific 2017. ISBN 978-981-3146-76-1

LEFEBVRE, Arthur H. a Vincent G. MCDONELL. Atomization and sprays. Second edition. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017.

BAYVEL, L. P. a Z. ORZECOWSKI. Liquid atomization. Washington, DC: Taylor & Francis, c1993. Combustion (New York, N.Y.: 1989). ISBN 0891169598.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 20. 9. 2017

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. ředitel ústavu | | doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty |

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi použití aditivních technologií (AT) při výrobě tlakových vířivých trysek, za účelem snížení finančních nákladů stejně jako výrobních časů dosahovaných stávajícími metodami výroby. Zadáním stanovuje několik cílů. Konkrétně byly detailně rozebrány jednotlivé metody 3D tisku, představen pro účely práce vybraný typ rozstříkovačích trysek společně s požadavky na něj kladenými. Dále byla vyhodnocena použitelnost jednotlivých zástupců AT a také provedeno jejich srovnání. Výsledkem práce jsou dvě potenciálně použitelné metody pro replikaci tlakových vířivých trysek, a to Micro Laser Sintering a Direct Metal Laser Sintering. Z časových důvodů a již tak velkého rozsahu práce, nebyl proveden volitelný 6. úkol a experimentální ověření touto prací stanovených závěrů zůstává otázkou pro další studie.

Klíčová slova

3D tisk, additive manufacturing, tlaková vířivá tryska, Micro Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the possibilities of using additive manufacturing (AM) in case of replication of pressure swirl atomizers in order to reduce the financial costs as well as the production times achieved by the existing production processes. Several goals were set by an assignment of this thesis. In particular, the individual 3D printing methods were discussed in detail and the specific selected type of spray nozzle was introduced, together with their requirements that have been elaborated in detail. The applicability of the individual representatives of AM was also evaluated, and their comparison was made. The result of this work are two potentially useful methods for replicating pressure swirl nozzles, namely Micro Laser Sintering and Direct Metal Laser Sintering. Due to lack of time and the already large extent of this thesis, an optional 6th task was not carried out and the experimental verification of these set conclusions remains a question for further studies.

Key words

3D print, additive manufacturing, pressure swirl atomizer, Micro Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PETRENEC, J. Možnosti replikace rozstříkovacích trysek metodou 3D tisku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Možnosti replikace rozstřikovacích trysek metodou 3D tisku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23. května 2018

Jan Petrenec

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych vyjádřil své upřímné poděkování vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a vstřícnost.

Práce vznikla s podporou projektů GA15-09040S a GA18-15839S, které finančně podpořila Grantová agentura České republiky a projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I“, kterým taktéž patří mé díky.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mojí rodině a přítelkyni za podporu, kterou mi poskytují celý život.

podpis

OBSAH

| | |
|---|----|
| ÚVOD..... | 11 |
| 1 Úvod do problematiky 3D tisku | 12 |
| 2 Proces 3D tisku..... | 13 |
| 2.1 Pre-processing..... | 13 |
| 2.2 Tisk — produkce | 14 |
| 2.2.1 Vat photopolymerization..... | 14 |
| 2.2.2 Powder Bed Fusion (PBF) | 15 |
| 2.2.3 Material Extrusion..... | 17 |
| 2.2.4 Material Jetting..... | 18 |
| 2.2.5 Binder Jetting | 19 |
| 2.2.6 Direct Energy Deposition (DED)..... | 20 |
| 2.2.7 Sheet Lamination | 21 |
| 2.3 Post-processing | 22 |
| 3 Tlaková vířivá tryska..... | 23 |
| 3.1 Rozprašování kapalin a tlakové vířivé trysky..... | 23 |
| 3.2 Tlaková vířivá tryska typu simplex..... | 23 |
| 3.3 Faktory ovlivňující kvalitu atomizace | 24 |
| 3.4 Vliv kvality povrchu trysky na její funkčnost..... | 25 |
| 3.5 Vliv rozměrové a tvarové přesnosti trysky na její funkčnost | 26 |
| 4 Požadavky kladené na tlakové vířivé trysky | 28 |
| 5 Potenciálně vhodné technologie pro výrobu trysky | 29 |
| 5.1 Zástupci Powder Bed Fusion | 29 |
| 5.1.1 Rozdíl mezi Selective Laser Sintering a Selective Laser Melting | 29 |
| 5.1.2 Selective Laser Sintering (SLS) | 29 |
| 5.1.3 Micro laser sintering (MLS)..... | 30 |
| 5.1.4 Direct Metal Laser Sintering (DMLS) | 32 |
| 5.2 Zástupci Material Jetting..... | 33 |
| 5.2.1 NanoParticle jetting (NPJ) | 34 |
| 5.3 Zástupci Binder Jetting (BJ) — tryskání pojiva | 35 |
| 6 Výběr vyhovující metody pro replikaci..... | 38 |
| 7 Výkresová dokumentace trysky..... | 40 |
| DISKUSE | 41 |
| ZÁVĚR..... | 42 |

| | |
|--|----|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 45 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 52 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 54 |
| SEZNAM TABULEK..... | 55 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 56 |

ÚVOD

Tato bakalářská práce si klade za cíl nalézt vhodnou metodu 3D tisku pro výrobu tlakových vířivých trysek. Svým tématem spojuje dvě velmi diskutované části průmyslu s širokou možností aplikace jejich výsledků. První oblast — 3D tisk, řadíme mezi aditivní technologie. Jde o princip výroby 3D objektů odlišným způsobem, než je zvykem v klasickém strojírenství. Základním rozdílem je, že stavební materiál postupně přidáváme po jednotlivých tisknutých vrstvách, které se k sobě spojují. Celý cyklus se opakuje, dokud není výrobek hotový. Toto smýšlení je natolik inovativní, že mělo, má a bude mít obrovský potenciál k neustálému vývoji jednotlivých aditivních technologií i použitelných tiskových materiálů a přináší spoustu výhod. Největší z nich jsou úspora materiálu, času, ceny a možnost tvorby tvarově složitých součástí, které bychom klasickými způsoby obrábění nebyli schopni vyrobit, anebo jen s velkými obtížemi. Příkladem může být tisk uzavřených dutin, které jinak než 3D tiskem nelze vytvořit.

Druhou oblastí, kterou se tato práce zabývá jsou rozstříkovací trysky, což jsou velmi malé funkční konstrukční zařízení s velikostmi detailů často v řádech mikrometrů a vysokými požadavky na tvarovou i rozměrovou přesnost, stejně tak jako na drsnost povrchu. Slouží k rozprašování kapalin (tzv. atomizaci), jejíž principem je roztříštění objemu kapaliny na malé částice (kapky) do okolního prostředí, čehož se využívá v široké škále technických aplikací od leteckého, automobilového a potravinářského průmyslu až po zemědělství. Výroba těchto komponent představuje časově i cenově náročný proces, a proto se naskytá možnost použití aditivních technologií s využitím jejich výhod k minimalizaci těchto nákladů.

Otázka řešení dvou výše zmíněných témat a z jejich kombinace vyplývající značně velký přínos v podobě snížení výrobních a časových nákladů v široké oblasti aplikací, byl pro osobu autora natolik zajímavý, že toto téma bylo vybráno.

V první části práce je všeobecně definován 3D tisk, jsou vysvětleny základní pojmy spojené s touto problematikou a vymezeny obecné cíle. Poté je podrobně popsán proces 3D tisku a jeho rozdělení dle normy ISO/ASTM 52900:2015 do sedmi základních skupin aditivních technologií, obsahující většinu dnes dostupných metod. Je provedeno počáteční zhodnocení použití jednotlivých skupin pro výrobu funkčních komponent a jsou uvedeny již realizovaná řešení replikace.

V druhé části je detailně představena touto prací vybraná rozstříkovací tryska společně s požadavky na ni kladenými. Současně je provedena rešerše vlivu kvality vnitřního obtékaného povrchu, rozměrové a tvarové přesnosti na funkčnost zařízení. Také jsou definovány přesné parametry trysky vycházející z vytvořené výkresové dokumentace, kterým by se vybrané aditivní technologie svými výtisky měly přiblížit.

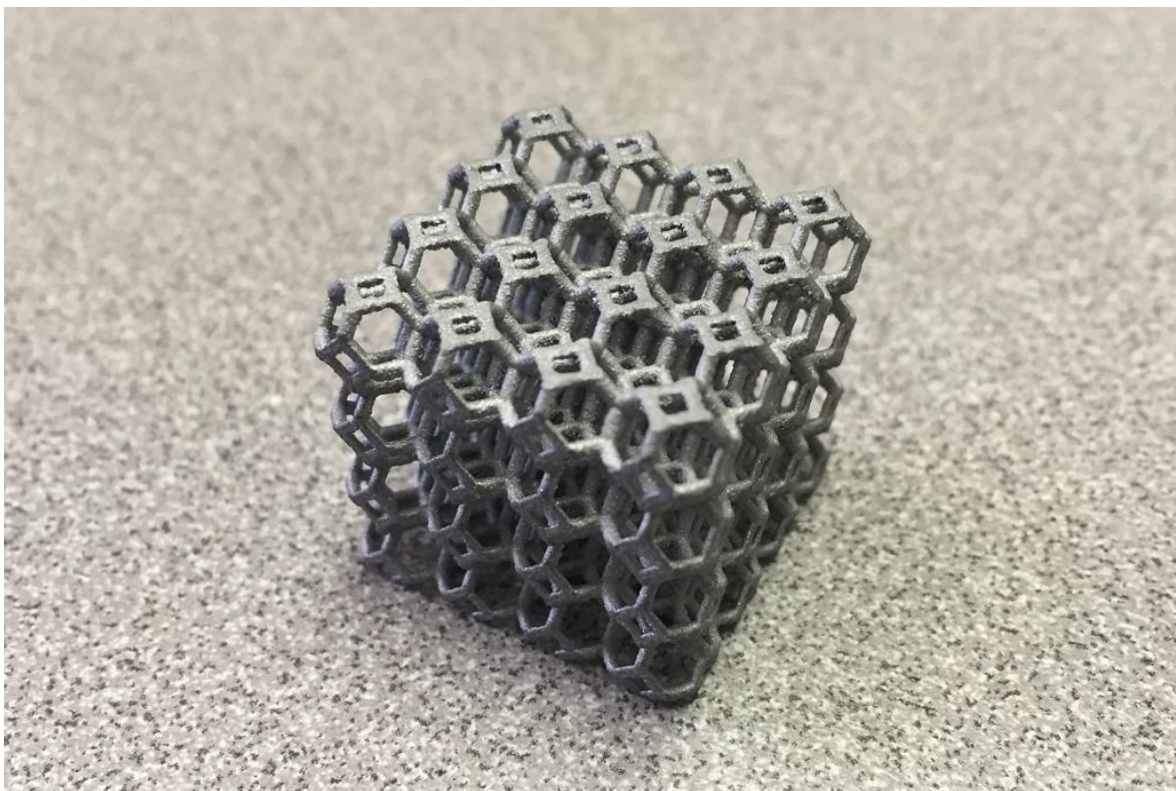
Třetí část práce se věnuje detailnímu popisu, srovnání a vyhodnocení použitelnosti zbývajících zástupců jednotlivých skupin aditivních technologií. Závěrem je výběr dvou potenciálně použitelných metod 3D tisku pro možnosti replikace, jimi dosahované výsledky a ostatní informace o nich dostupné. Konkrétně to jsou Micro Laser Sintering a Direct Metal Laser Sintering.

1 Úvod do problematiky 3D tisku

3D tisk řadíme mezi aditivní technologie (AT), které se začaly vyvíjet v 80. letech 20. století. [1] Jde o způsob výroby trojrozměrných objektů přímo z 3D modelových dat. [2] Na rozdíl od subtraktivních metod, kdy se materiál postupně odebírá z polotovaru, jako tomu je například u obrábění na CNC strojích [3], AT vytváří 3D objekty postupným přidáváním materiálu po jednotlivých tenkých vrstvách konstantní tloušťky, které se k sobě spojují. Celý proces se opakuje, dokud součást není dokončena. [2]

První oblast uplatnění 3D tisku je označována jako *rapid prototyping (RP)*. Pojmem RP definujeme rychlou a levnou tvorbu zkušebních prototypů. [1, 4] Druhá oblast je nazývána *additive manufacturing (AM)*, která taktéž směřuje k rychlé a levné tvorbě, avšak kompletních funkčních konstrukčních součástí ve velkém počtu, čemuž odpovídá trend dnešního vývoje AT a čehož se snaží dosáhnout zadání této práce. [4, 5]

Rychlý rozvoj a široké využití AT je dán jejich hlavními výhodami, a to minimalizací času od návrhu po samotnou výrobu součástky (prototypu) s nízkými náklady, dále pak možností tisknout prakticky tvarově libovolné prvky, které klasickými způsoby nelze vyrobit, anebo jen s velkými obtížemi, jako např. tisk uzavřených dutin. [2, 5]



Obr. 1 Příklad možností AT — 4 g výtisk z Al, který unese závaží o hmotnosti 408 kg [6]

AT používají celé spektrum materiálů, které se rok od roku zvětšuje. Nejvíce užívanými jsou polymerní materiály (ABS, PVA, PLA atd.) a kovy (ocel, titan, zlato, stříbro atd.), ale lze tisknout také z biochemických materiálů (fosforečnan vápníku, silikon atd.), keramiky, skla, papíru, a dokonce i čokolády. [7–9]

2 Proces 3D tisku

Pro výběr konkrétních metod pro danou řešerši výroby trysky je nutno rozebrat celý proces 3D tisku, který se dle [10] skládá ze tří fází: pre-processingu, vlastní produkce — tisku a post-processingu, kterým budou věnovány následující kapitoly.

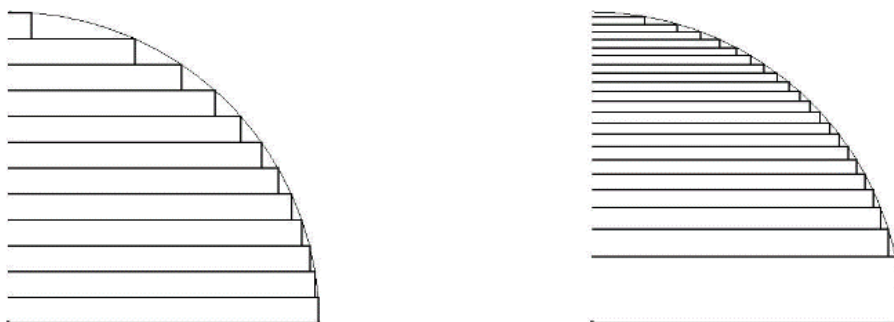
2.1 Pre-processing

Tato fáze procesu 3D tisku je společná všem metodám popsaným v kapitole 2.2 *Tisk — produkce* a případné odlišnosti budou uvedeny u konkrétních AT.

Prvním krokem ve výrobě komponent je tvorba softwarového 3D modelu pomocí CAD (computer aided design [11]) modelovacích systémů, nebo reverzním inženýrstvím s využitím 3D skenerů, případně kombinací obou zmíněných metod.[1, 12, 13] Další možnost je použití již hotových volně dostupných modelů z databází na internetu. [14]

Druhým krokem je převedení CAD modelu na síť rovinných trojúhelníkových ploch, označovaných jako STL formát, pomocí nichž aproximujeme celý povrch komponenty. Tato část je často kritickým místem pre-processingu, neboť se projeví nedokonalosti modelu (neuzavřené plochy, otočené normály trojúhelníků, chybné hrany objektu, děravý model atd.) Tyto chyby je potřeba ještě před samotným převedením opravit. [12, 15, 16]

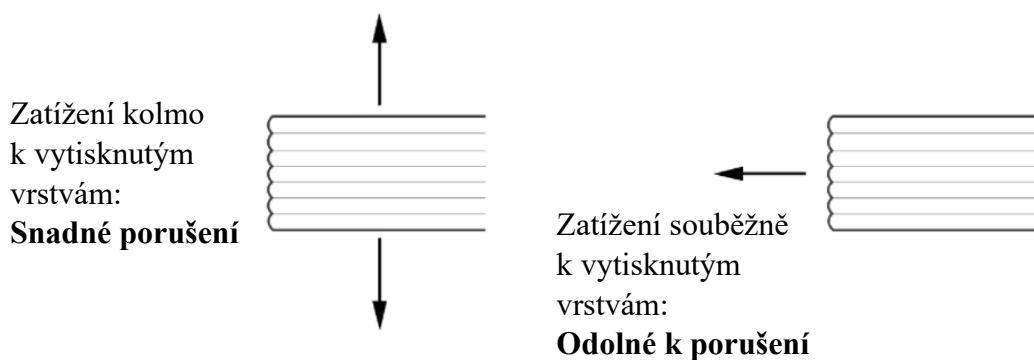
STL formát se následně exportuje do tzv. *sliceru*. Primární funkcí tohoto programu je rozřezání na jednotlivé horizontální vrstvy a s tím spojená volba jejich výšky. Čím jsou vrstvy tenčí, tím víc se prodlužuje čas tisku, ale o to lepší bude kvalita povrchu, přesnější geometrie a naopak (viz Obr. 2). [1, 17]



Obr. 2 Přesnost výtisku v závislosti na tvaru (metoda aproximuje tvar pomocí vrstev) [18]

Při výrobě tvarově složitých dílů pomocí některých AT (viz kapitola 2.2 *Tisk — produkce*) se vyžaduje tisk tzv. dočasných podpor, aby nedošlo ke zborcení přesazených částí komponent pod vlastní tíhou. Jejich návrh, rozmístění a s nimi související případná změna orientace modelu vůči základové platformě je další z funkcí *sliceru*. [12, 18, 19]

Vhodná změna orientace je nutná i s ohledem na požadované mechanické vlastnosti komponenty, jelikož u některých technologií, jako například *Fused Deposition Modeling (FDM)* (viz kapitola 2.2.3 *Material Extrusion*), má výtisk heterogenní mechanické vlastnosti vzhledem ke směru nanesených vrstev, jak naznačuje Obr. 3. [20, 21]



Obr. 3 Heterogenní mechanické vlastnosti při FDM tisku — přizpůsobeno z [21]

Výstupem ze *sliceru* je finální formát G-kód obsahující veškeré potřebné informace, který je odeslán do tiskárny. [1, 18]

2.2 Tisk — produkce

Hlavní část výrobního cyklu komponent představuje samotný tisk. V oblasti AT je v dnešní době nespočetné množství různých technologií a materiálů, které se používají a neustále vyvíjejí. Norma ISO/ASTM 52900:2015 rozděluje AT do sedmi základních skupin uvedených na Obr. 4, které zahrnují téměř všechny existující zástupce 3D tisku. Konkrétně to jsou: *Vat photopolymerization*, *Material Extrusion*, *Material Jetting*, *Binder Jetting*, *Direct Energy Deposition* a *Sheet Lamination* [22] (názvy skupin a jejich zástupců jsou uvedeny v anglickém jazyce, protože české překlady těchto výrazů nejsou až tak ustálené). Tyto skupiny obsahují vyhovující i nevyhovující technologie pro výrobu tlakových vířivých trysek, které jsou předmětem zadání této práce. Jde o funkční součásti velmi malých rozměrů s prvky o velikostech často pohybujících se v řádech mikrometrů [23], jejichž detailnímu představení se věnuje kapitola 3 *Tlaková vířivá tryska*. V následujících podkapitolách jsou rozebrány jednotlivé skupiny AT a provedeno počáteční zhodnocení jejich vhodnosti použití při výrobě rozprašovacích trysek.

| 7 základních skupin aditivních technologií a jejich zástupci | | | | | | |
|--|--------------------|----------------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | | | | | | |
| Vat photopolymerization | Material Extrusion | Material Jetting | Binder Jetting | Powder Bed Fusion | Direct Energy Deposition | Sheet Lamination |
| SLA DLP | FDM | MJ / MJP / Polyjet NPJ DOD | BJ CJP | SLS / MJF SLM / DSLM EBM | LMD EBAM | LOM STRATO- CONCEPTION |

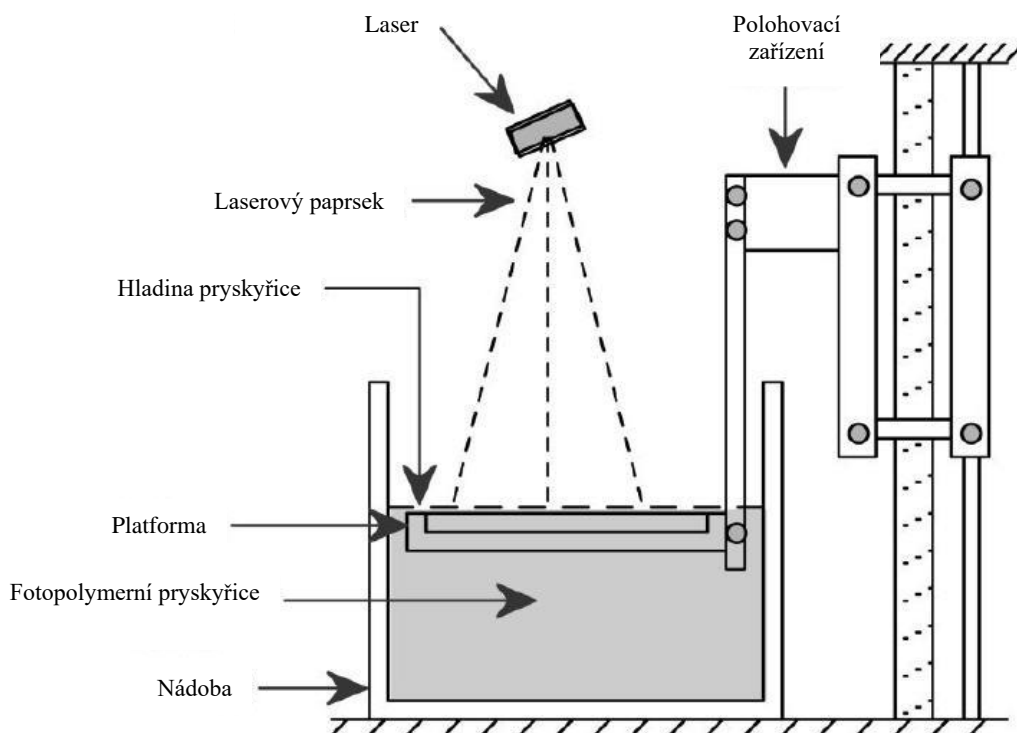
Obr. 4 Základní rozdělení skupin AT — přizpůsobeno z [24]

2.2.1 Vat photopolymerization

První skupinou metod AT je *Vat photopolymerization* (VP), česky fotopolymerizace. [25] Základním principem této skupiny metod je využití světelného paprsku o určité vlnové délce, který prochází nádobou s kapalnou fotopolymerní pryskyřicí a tím jí pomocí chemické reakce

zvané fotopolymerizace mění na pevnou fázi. V lázni je uložena stavební platforma, která se vertikálně posouvá po výtisku každé vrstvy o výšku jedné tisknuté vrstvy. [26, 27]

Tiskové zařízení je naznačeno na Obr. 5 níže — konkrétně pro metodu *Stereolithography (SLA)*, která je předním zástupcem VP a první 3D tisková technologie vůbec. Uváděnou výhodou této metody je dobrá kvalita detailů a povrchu. U průmyslových typů tiskáren se uvádí rozměrová přesnost $\pm 0,01$ mm a výška vrstev 25–100 μm . S použitím SLA vzniká nutnost tisku podpor a jejich následné odstranění v části post-processing. VP se využívá převážně pro tisk nefunkčních prototypů, jelikož výtisky bývají velmi křehké a při delším vystavení slunečnímu záření hrozí jejich znehodnocení. Tyto technologie zpravidla potřebují dokončovací operace povrchu. [28, 29] Mezi další metody VP řadíme *Direct Light Processing (DLP)* a *Continuous DLP (CDLP)*. [27]

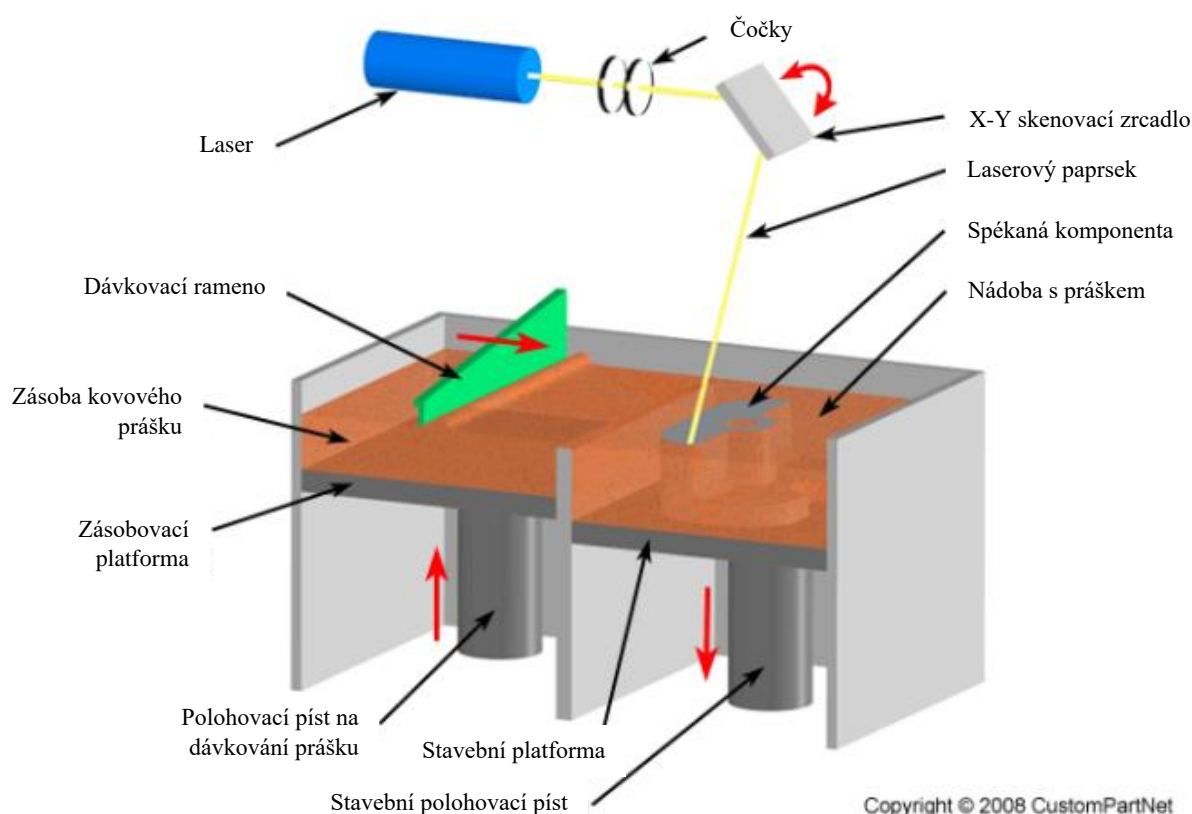


Obr. 5 Princip tisku SLA — přizpůsobeno z [30]

Jelikož se skupina VP používá převážně pro tisk nefunkčních prototypů, jako bylo demonstrováno na konkrétním zástupci SLA, je vhodnost použití první skupiny značně nevyhovující pro zadání této práce a VP nebude více rozebírána.

2.2.2 Powder Bed Fusion (PBF)

PBF se do češtiny překládá jako spékání práškové vrstvy. [25] Jak již z názvu vyplývá, k tisku se používají materiály v podobě jemnozrnného prášku (plastového, kovového atd.), který je opakovaně celoplošně nanášen vrstvu po vrstvě. Ke spojování slouží zdroj tepla. Tím zpravidla bývá laser, nebo elektronový paprsek, který je umístěn na pohyblivé hlavě a spéká vybraná místa. Jakmile je první vrstva vypálena a ztuhlá, stavební platforma se posune směrem dolů o výšku jedné tisknuté vrstvy. Následně je nanesen další prášek a celý cyklus se opakuje, dokud komponenta není kompletní. Princip tisku PBF je ilustrován na Obr. 6 na konkrétním zástupci této skupiny — *Selective Laser Sintering (SLS)*. [27, 31]



Obr. 6 Princip tisku technologie SLS — přizpůsobeno z [32]

Dalšími zástupci PBF dle [27, 31] jsou:

- *Selective Laser Melting (SLM)*
- *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*
- *Electron Beam Melting (EBM)*
- *Multi Jet Fusion (MJF)*
- *Micro laser sintering (MLS)* [33]

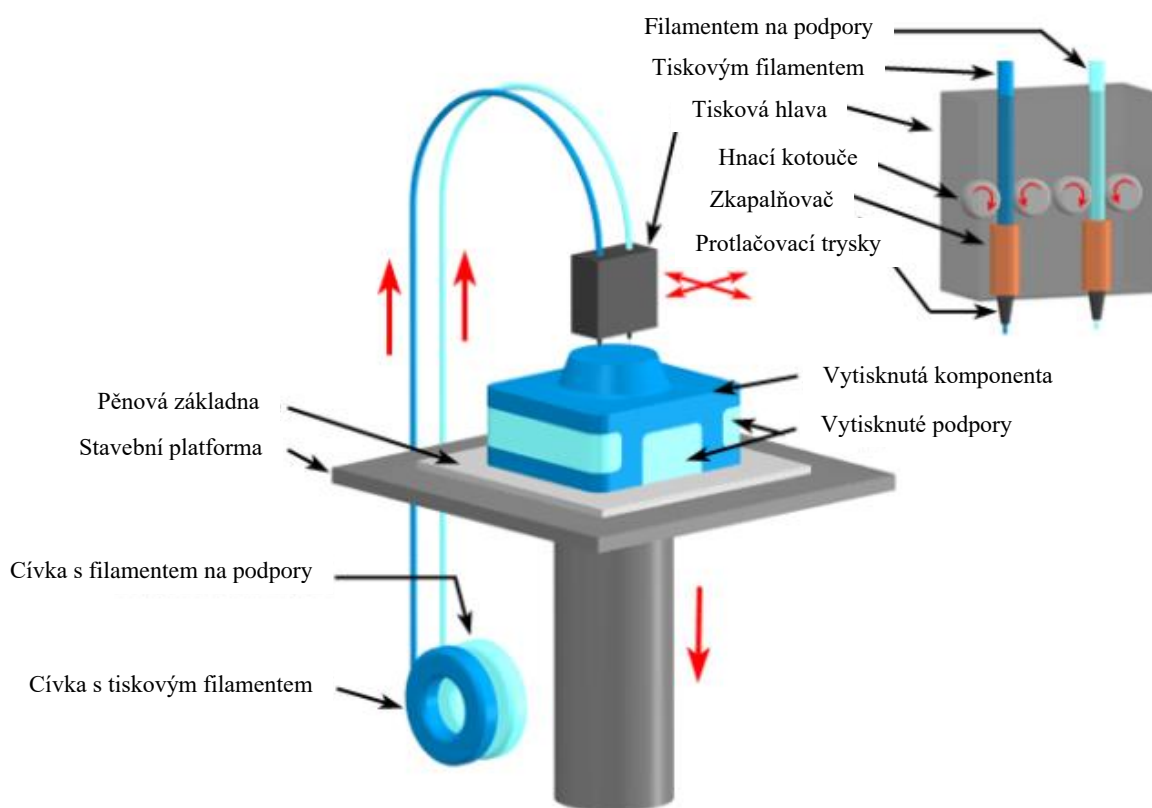
PBF stejně jako ostatní technologie používající materiály ve formě prášku, nevyžaduje tvorbu podpor, jelikož celoplošně nanesený prášek všude okolo výtisku plní tuto funkci. V části post-processing se provádí následné vyproštění komponenty z bloku nespečeného materiálu, který je možné sesbírat a znovu použít. Následuje očištění součásti pomocí proudu stlačeného vzduchu a případně je její povrch dodatečně opracován ke zlepšení jeho kvality na velmi jemný, jelikož výtisky mívají často vysokou drsnost. Mezi nevýhody metod PBF patří vnitřní pórovitost a z ní vycházející celková křehkost, výskyt sraženin, nebo překroucení během tisku vlivem tepelné dilatace. Naopak výhodou jsou velmi dobré mechanické vlastnosti, jako je vysoká pevnost a tuhost vytvořených komponent. [27, 31]

Dle článku [34] v minulosti měla být pomocí skupiny PBF vytvořena rozprašovací tryska do trysového motoru LEAP. Bylo v plánu vytvářet 20 μm vysoké vrstvy z tiskového prášku z kobaltu a chromu v kombinaci se selektivním laserovým vypalováním. Výrobky se v letadlech měly aplikovat na přelomu let 2015/2016. Zdroj [35] potvrzuje, že společnost General Electric opravdu tryšku vyrobila a letadla, v kterých je použita, přepravila již více než 5 milionů pasažérů. Dříve vyráběných 20 částí této komponenty bylo sloučeno díky

AM do jednoho dílu. Vytisknutá tryška má o 25 % nižší hmotnost a vydrží až pětkrát více než tryška vyrobená obráběním nebo odléváním. Bylo zaznamenáno snížení spotřeby paliva motoru LEAP o 15 % v porovnání s dříve používaným motorem CFM. [35] Z tohoto odstavce vyplývá, že skupina PBF je schopna splnit zadání a její zástupci budou více diskutováni a detailněji rozebráni v kapitole 5 *Potenciálně vhodné technologie pro výrobu trys.*

2.2.3 Material Extrusion

Material Extrusion (ME), česky vytlačování materiálu [25], je jeden z nejrozšířenějších způsobů 3D tisku založený na protlačování materiálu ve formě vláken (filamentů) skrz tavící protlačovací tryšku, která je pohyblivá ve dvou až třech osách. Roztavený materiál je nanášen na konkrétní místa až dojde k vytvoření první vrstvy. Výtisk postupně tvrdne a je nanášena další a další vrstva, dokud není výrobek hotový. Princip tisku je naznačen na Obr. 7.



Obr. 7 Princip tisku ME — přizpůsobeno z [32]

Jedním ze zástupců ME je *Fused Deposition Modeling (FDM)*. [27, 36] Tato metoda je poměrně rychlou a cenově dostupnou, často používanou také u domácích 3D tiskáren. Umožňuje použití široké škály termoplastů, jako nylon, ABS, nebo PEEK atd. Podle [37] je používaná výška vrstev kolem 50–400 μm a dosahovaná průmyslová přesnost se pohybuje kolem $\pm 0,2 \text{ mm}$, což je v porovnání s ostatními AT nejhorší výsledek.

ME vyžaduje tvorbu podpor ze stejného nebo případně rozdílného stavebního materiálu, jako je komponenta. K tomuto účelu se používá více tiskových hlav. Objem podpor zvyšuje finální tiskový čas i jeho cenu. Nejčastějším defektem této metody je z anglického „*warping*“ zkroucení již naneseného materiálu, způsobené vnitřním pnutím, které je zapříčiněno rozdílnou

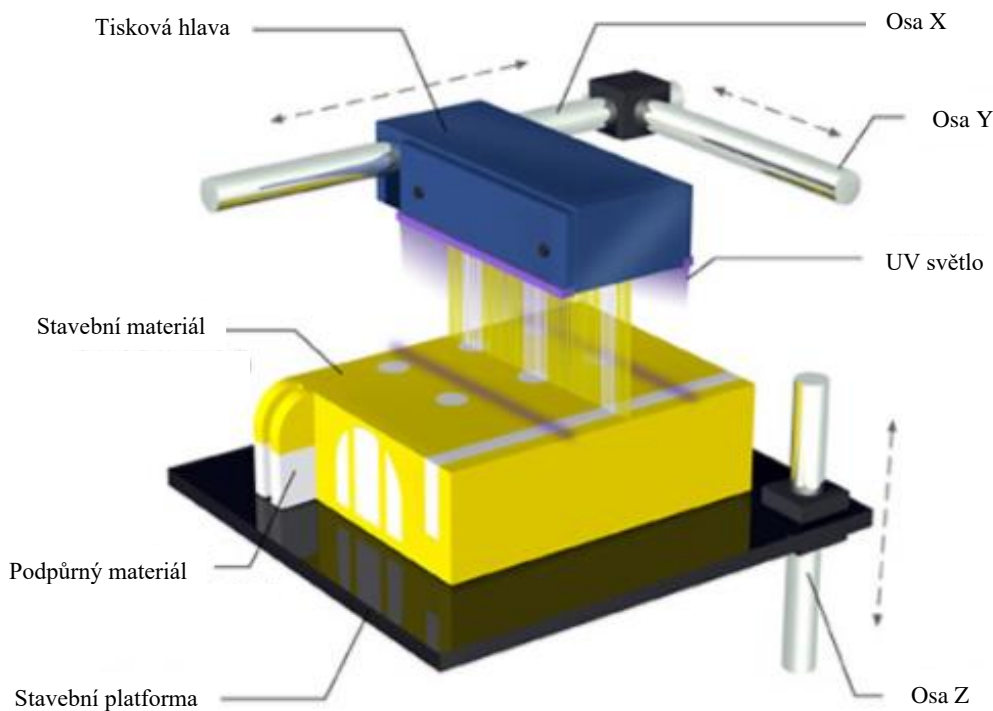
rychlostí tuhnutí. Snížení rizika výskytu těchto vad se dosahuje pomocí chladících ventilátorů umístěných na tiskových hlavách. [36, 37]

Jelikož podle zdroje [37] ME, konkrétně její zástupce FDM, má v porovnání s ostatními AT jedny z nejhorších výsledků v oblasti přesnosti 3D tisku a tato práce se zabývá vysoce tvarově i geometricky přesnými součástmi, je ME pro účely zadání nevyhovující a nebude více rozebírána.

2.2.4 Material Jetting

Material Jetting (MJ), neboli nanášení tryskáním [25], je skupina AT, často přirovnávaných ke klasickým 2D tiskárnám. Tato technologie využívají více tiskových hlav umístěných vedle sebe, které selektivně nanáší nejčastěji rozehrátý fotopolymer, kov nebo vosk ve formě malých kapek na celou tisknutou plochu najednou. Právě schopnost materiálu tvořit tyto velmi malé kapky společně s jeho viskozitou jsou největším omezením této metody a značně zmenšují portfolio použitelných materiálů. V průběhu nebo po nanesení tisknuté vrstvy dochází ke spékání vybraných částí pomocí UV světla, případně vytvrzování vysokými teplotami.

Při použití vhodného materiálu MJ dosahuje vysokých rozměrových a tvarových přesností, pohybujících se okolo ± 0.05 mm. Průměrná výška vrstev je 16–32 μm . Díky většímu počtu tiskových hlav umožňuje MJ tisknout více materiálů najednou, tedy i ve více barvách a různých pevnostech. Například tiskárna Objet 500 Connex 3 je schopna tisknout až v čtyřiceti šesti barvách. MJ vyžaduje použití podpor z pravidla z jiného rozpustného materiálu, než je materiál samotné komponenty. Jejich odstranění probíhá v části post-processing tlakem vody nebo v ultrazvukové lázni. [27, 38, 39]



Obr. 8 Princip tisku MJ — přizpůsobeno z [32]

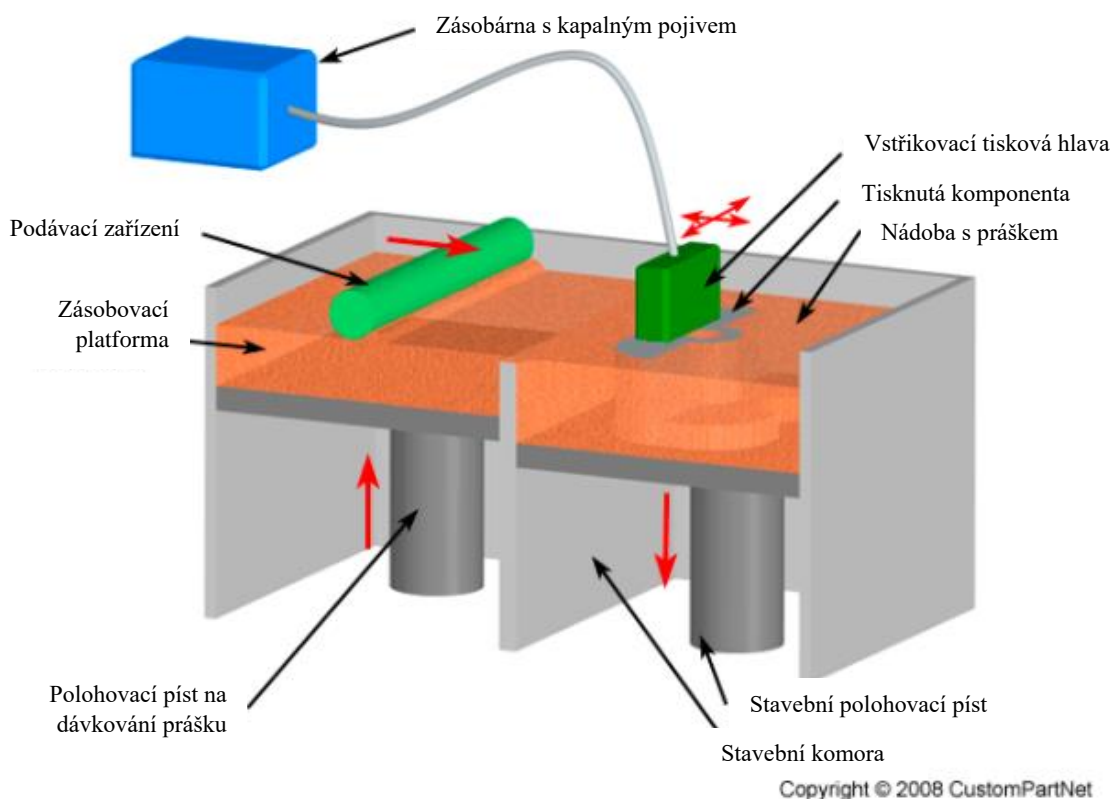
Zástupci skupiny MJ jsou:

- *Material Jetting (MJ)*
- *Drop-On-Demand (DOD)*
- *Nano Particle jetting (NPJ)* [27, 40]

Případné využití této skupiny pro zadání práce bude více detailně diskutováno v kapitole 5 *Potenciálně vhodné technologie pro výrobu trys.*

2.2.5 Binder Jetting

Skupina *Binder Jetting (BJ)* neboli česky tryskání pojiva [25] a její stejnojmenný zástupce je technologie fungující na principu opakovaného celoplošného nanášení tiskového materiálu v práškové podobě (nejčastěji kov nebo keramika), který je následně selektivně spojován pomocí kapalného pojiva tryskaného z tiskové hlavy v podobě kapek. Jakmile dojde ke ztuhnutí pojiva a vrstva je dokončena, stavební platforma se vertikálně posouvá dolů o výšku jedné tisknuté vrstvy a celý cyklus se opakuje znovu, dokud není komponenta kompletní.



Obr. 9 Princip tisku technologie BJ — přizpůsobeno z [32]

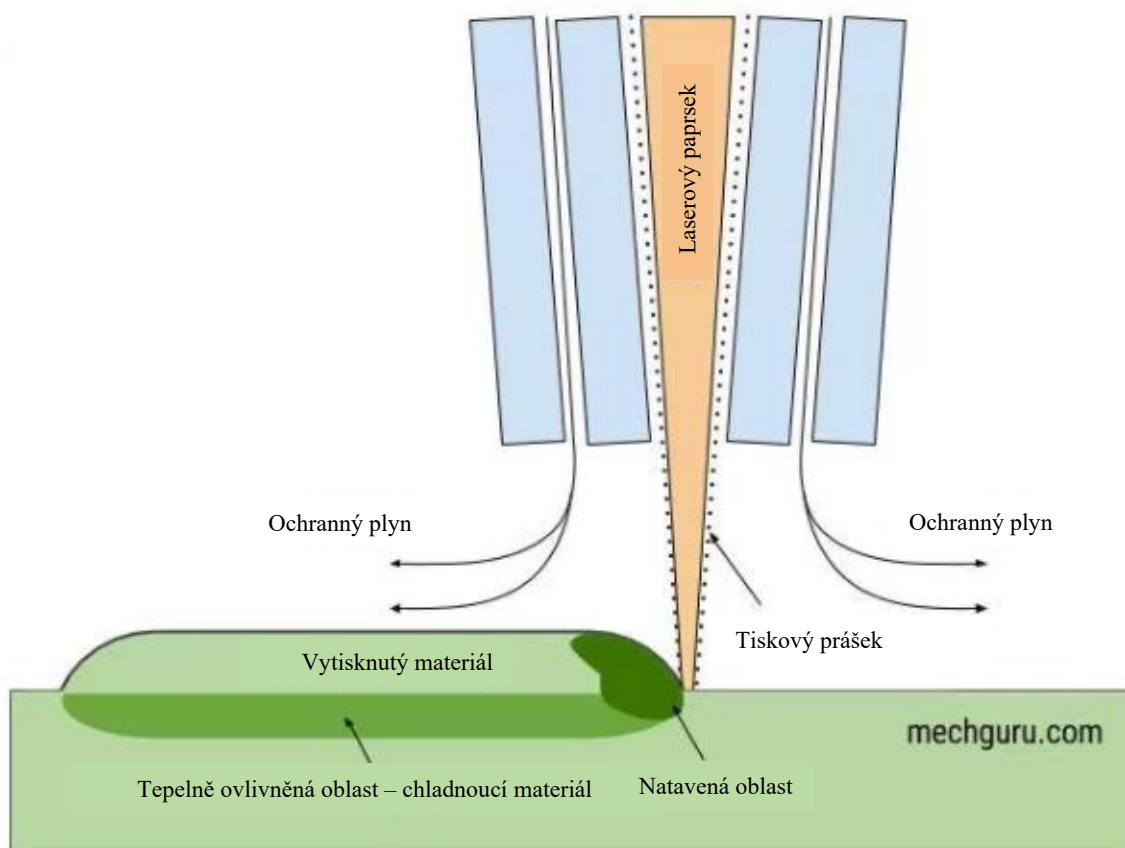
Technologie BJ nevyžadují tisk podpor, jelikož samotný prášek plní tuto funkci, jako tomu je u PBF. Na druhou stranu post-processing je nutností, neboť se musí odstranit nespojený materiál, abychom mohli komponentu vyjmout.

V případě použití kovového prášku jsou výtisky BJ použitelné, jako funkční součásti, ale mají horší mechanické vlastnosti než při použití technologie SLM, nebo DMLS. Výhodou však je nižší cena, která v porovnání s DMSL/SLM je až 10× nižší. [27, 41, 42]

Použitelnost této metody pro účely práce bude diskutována v kapitole 5 *Potenciálně vhodné technologie pro výrobu trysk* za účelem snížení výrobních nákladů, i přes srovnatelně horší mechanické vlastnosti než technologie DMSL a SLM.

2.2.6 Direct Energy Deposition (DED)

Skupina DED — přímé energetické nanášení [25] pracuje na podobném principu, jako již uvedená skupina metod PBF. Společné je využití zdroje energie — laserového nebo elektronového paprsku k tavení materiálu v podobě prášku, případně vlákna (filamentu) navinutého na cívce. Tisková hlava umístěná na robotické ruce, která je schopná pohybu ve čtyřech až pěti osách, obsahuje trysku s přívodem materiálu pod ochranou inertního plynu a zároveň i přímý zdroj energie. Celý proces nanášení a tavení probíhá zároveň přímo v místě tvorby (případně opravy) části komponenty. Materiál velmi rychle tuhne a vytváří se jednotlivé vrstvy o obvyklé tloušťce 0,25–0,5 mm.



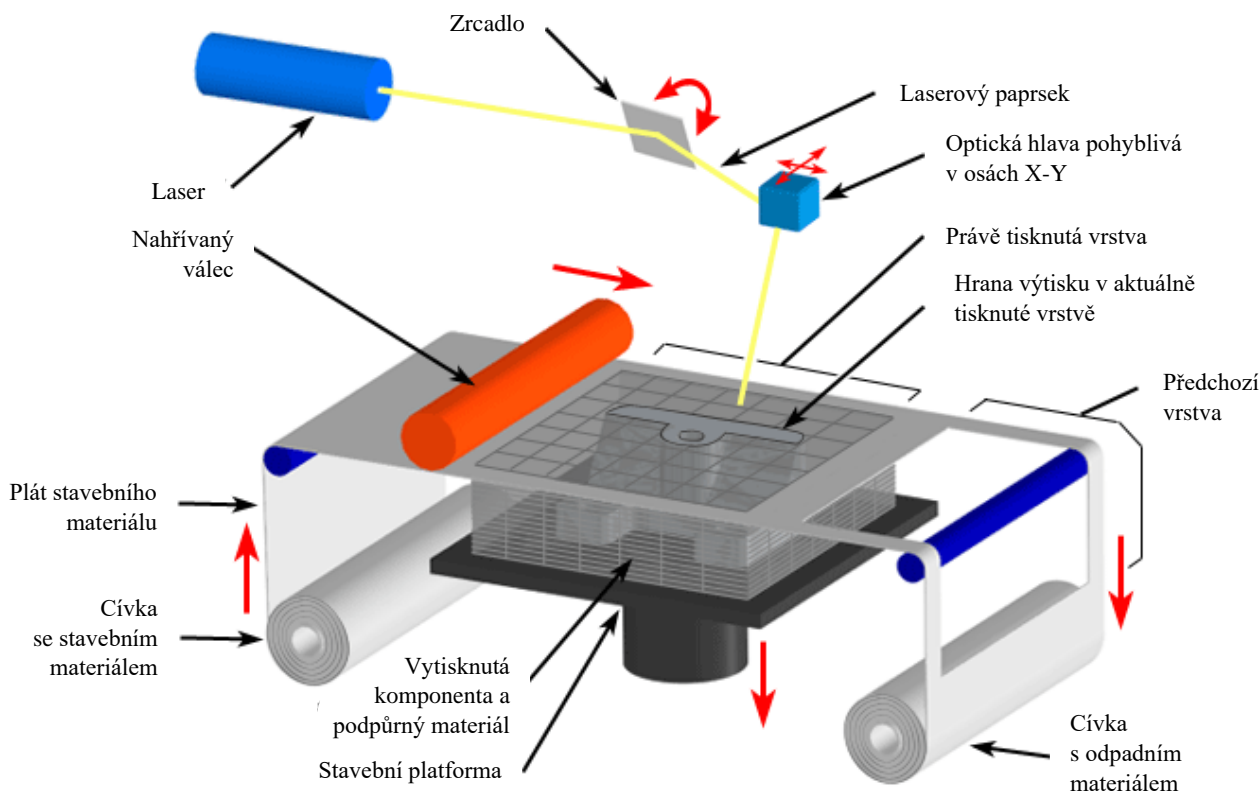
Obr. 10 Princip fungování Laser Engineered Net Shape — přizpůsobeno z [32]

Zástupci této skupiny jsou *Laser Engineered Net Shape (LENS)* a *Electron Beam Additive Manufacture (EBAM)*. Tyto metody slouží převážně ke kovotisku určenému nejčastěji k opravám a nanášení přídatného materiálu na již vytvořené komponenty [27, 43], a proto se jim tato práce více nebude věnovat.

2.2.7 Sheet Lamination

Poslední skupinou AT je *Sheet Lamination (SL)* neboli laminace plátů. [25] Technologie je založena na principu postupného vrstvení kovových (případně papírových) plátů na sebe, které jsou následně ultrazvukově svařovány (případně lepeny) k sobě a ořezány pomocí laseru (případně velmi ostrého nože) do tvaru odpovídajícího dané tisknuté vrstvě. Po dokončení těchto kroků dojde k posunutí stavební platformy ve vertikálním směru dolů a vše je připraveno k opětovnému přivedení dalšího plátu. Celý cyklus se opakuje znovu dokud není komponenta dokončena.

Do skupiny SL spadají dva zástupci. Při použití papíru jde o *Laminated object manufacturing (LOM)* a v případě kovových plátů jde o technologii *Ultrasonic additive manufacturing (UAM)*, která pracuje s materiály jako hliník, měď, ocel, nebo titan a jejíž princip tisku je naznačen na následujícím Obr. 11. [44, 45]



Obr. 11 Princip tisku UAM — přizpůsobeno z [32]

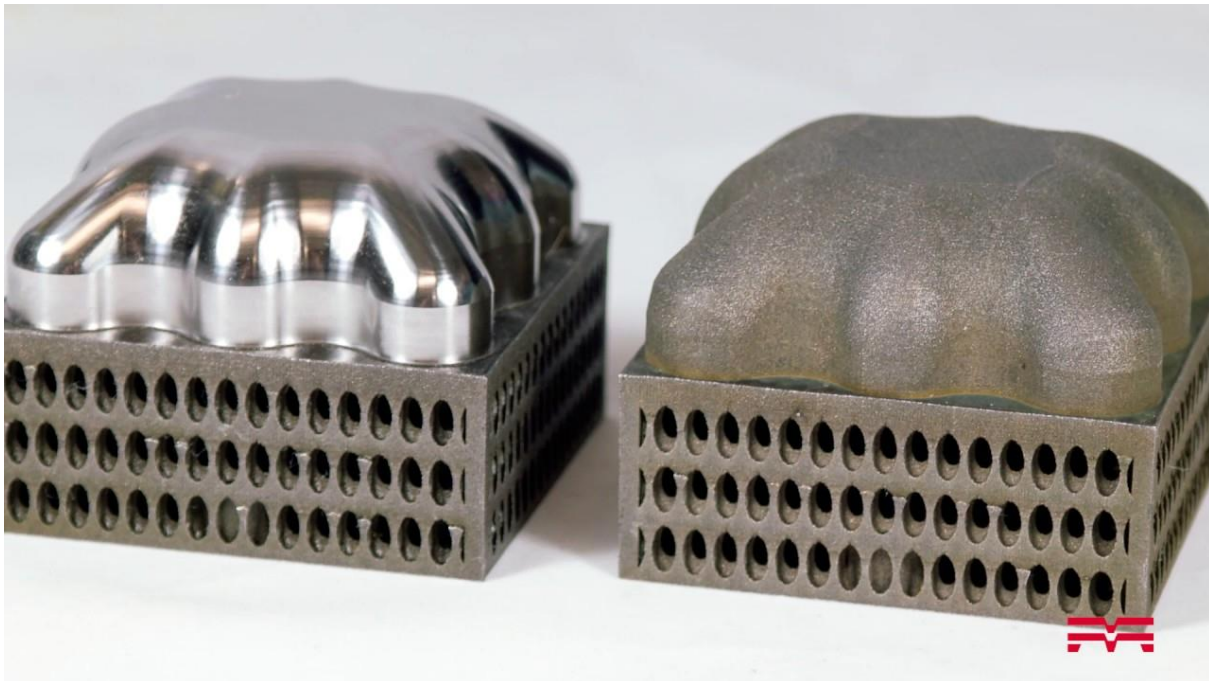
V případě použití SL je nutné dodatečné CNC obrábění, nebo jiné strojní odstranění nepotřebného materiálu, a to ještě během tisku, nebo po jeho dokončení, aby bylo možné vytisknutou komponentu z masy materiálu vyjmout.

Tyto metody slouží k velmi rychlé a cenově výhodné tvorbě nefunkčních modelů, převážně za účelem vizualizace daného objektu. [44, 45] Z tohoto důvodu je aplikovatelnost SL pro výrobu tlakových vířivých trysek nevhodná a touto skupinou AT se již více tato práce nebude zabývat.

2.3 Post-processing

Poslední částí ve výrobním procesu komponent je post-processing, který je rozdílný podle daného typu metody a výsledných požadavků na finální podobu výrobku.

Jak bylo uvedeno u některých výše zmíněných metod, častou dokončovací metodou je odstranění podpor, a to buď odlamováním, otryskáním, nebo chemickou cestou pomocí máčení ve speciálních rozpouštědlech. Dále se provádějí povrchové úpravy ke zlepšení mechanických vlastností. Běžně se používá broušení a následné lakování, nebo pokovování. Při požadavku dokonalých povrchů a vysokých rozměrových přesností se také jako dokončovací metoda používá vrtání, obrábění, leštění apod. pomocí obráběcích strojů. Nedílnou součástí post-processingu je také případné barvení povrchu a jiné estetické úpravy dle požadavku zákazníka. Jelikož se většina prototypů vyrábí z termoplastů, tak častou používanou dokončovací metodou je natavování v peci, kdy dochází k vyrovnaní nerovností. [18, 46]



Obr. 12 Před (vpravo) a po (vlevo) obroušení stěn výtisku [47]

3 Tlaková vířivá tryska

Pro posouzení možností výroby pomocí AT je vybrána tlaková vířivá tryska, konkrétně typu simplex, jejíž představení a popisu fungování se věnuje následující kapitola. Také je provedena rešerše vlivu kvality povrchu, rozměrové a tvarové přesnosti na její funkčnost — tedy kvalitu spreje.

3.1 Rozprašování kapalin a tlakové vířivé trysky

Trysky jsou zařízení, která se používají k rozprašování kapalin (tzv. *atomizaci*), jejímž principem je roztržení objemu kapaliny na malé částice (kapky) do okolního prostředí tzn. překonání povrchového napětí a viskozity kapaliny vlivem působení vnitřních a vnějších sil za vzniku spreje.

Předpokladem dobrého rozprašování kapalin je dostatečná relativní rychlost proudu kapaliny vůči okolnímu médium (vzduchu nebo jinému plynu), čehož se dosahuje dvěma základními způsoby. Prvním je dodáním potřebné kinetické energie kapalině a její následné vystavení relativně pomalu proudícímu vzduchu v okolí trysky. Druhý způsob je označován anglickými výrazy *airblast* nebo *air-assist* a funguje na opačném principu vystavení pomalu pohybující se kapaliny rychle proudícímu vzduchu.

Vzhledem k široké škále uplatnění trysek (jako např. spalovací komory a motory, plynové turbíny, rakety, zemědělství, medicína, metrologie a mnoho dalších) bylo vyvinuto několik různých typů trysek, které se liší podle způsobu dodávání kinetické energie kapalině. Předmětem zkoumání této práce je tlaková vířivá tryska, která patří mezi nejvíce používané kvůli své jednoduché konstrukci a absenci nutnosti dodávat dodatečnou energii nebo případně další proudící médium.

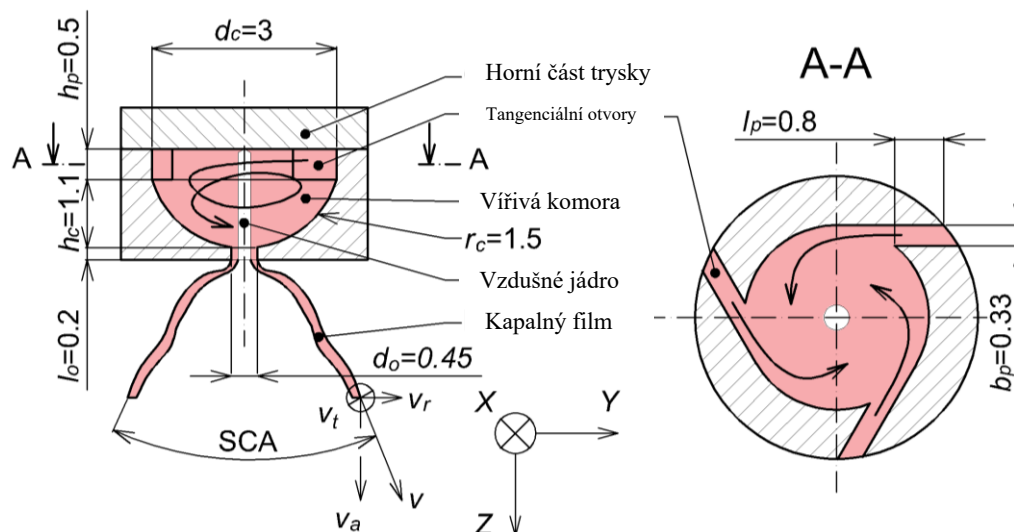
Tlakové vířivé trysky pracují na principu dodávání tlakové energie, která se při průchodu skrz malý výstupní otvor na konci trysky přemění podle Bernoulliho rovnice na kinetickou energii. Při následné interakci s okolním pomalejším vzduchem (případně jiným médiem) dojde k vytvoření spreje, čímž kapalina několikanásobně zvětší svůj povrch. Pro lepší představu při zanedbání ztrát vlivem tření se pomocí tlaku o velikosti 138 kPa při použití uhlovodíkových paliv vytvoří sprej o výtokové rychlosti 18,6 m/s. S vyššími tlaky lze dosáhnout ještě vyšších rychlostí.

Největším nedostatkem tlakových vířivých trysek — konkrétně typu simplex, kterým se více věnuje následující podkapitola, je právě to, že kvalita spreje a s ním spojená velikost kapek je úměrná vstupnímu tlaku a hmotnostním průtokům proudícího média (paliva). Dle knihy [48] se průtok paliva tryskou mění s druhou odmocninou diferenciálu vstřikovacího tlaku, a tedy dvojnásobné zvýšení průtokové rychlosti znamená čtyřnásobné zvýšení tlaku, což ne vždy je možné konstrukčně realizovat. [23, 48]

3.2 Tlaková vířivá tryska typu simplex

Nejjednodušším typem tlakových vířivých trysek je *simplex type*. Kapalina je vháněna pomocí tečně orientovaných tangenciálních otvorů do vířivé komory, kde dochází k jejímu rozvíření a rotaci po vnitřních stěnách. Při dosažení určité rychlosti víření vzniká ve vířivé komoře dostatečný podtlak, který způsobí nasátí vzduchu z okolí a vytvoření vzdušného jádra v ose komory. Kapalina vířivě stéká po stěnách komory až nakonec odchází z trysky pomocí

výstupního otvoru, kdy při interakci s okolním vzduchem (plynem) vytváří dutý kuželový kapalný film ve formě tenkého mezikruží, jak je naznačeno na Obr. 13. [23, 48]



Obr. 13 Tlaková vířivá tryska typu simplex — přizpůsobeno z [49]

Vlivem další interakce s okolním médiem (vzduchem nebo jiným plynem) dochází k postupnému ztenčování a rozšiřování dutého kapalného kuželového filmu, až dojde k jeho deformování a následnému trhání. Tomuto jevu se říká *primární atomizace*. Poté dochází k dalšímu rozpadu kousků filmu na velké kapky, které se dále rozpadají na menší a menší znovu vlivem interakce s okolním vzduchem (plynem). Tomuto druhotnému rozpadu říkáme *sekundární atomizace*. [23, 48]

3.3 Faktory ovlivňující kvalitu atomizace

Prvními faktory ovlivňující výsledek atomizace jsou *velikost* a *celková geometrie trysky*, které je možné přizpůsobit při samotném návrhu. Ten však tato práce pouze přejímá a nezabývá se optimalizací v tomto směru. Vhodnou volbou metody 3D tisku však lze ovlivnit *kvalitu povrchu trysky* a *rozměrové* a *tvarové přesnosti* komponenty, které taktéž značně ovlivňují finální výsledek vzniku kapalného filmu.

V diplomové práci [84] a v knize [23] je uvedeno, že největší vliv na kvalitu spreje mají následující tři parametry trysky: *průměr tečných tangenciálních vstupů*, *průměr výstupního otvoru* a *průměr vířivé komory*. Jakékoli odchylky od ideálního tvaru a rozměrů způsobují změny v požadovaném proudění a dochází ke snížení účinnosti trysky stejně jako kvality rozprašování kapalin. Proto by se skutečné rozměry těchto částí měly co nejvíce shodovat s rozměry požadovanými výkresovou dokumentací.

Dalšími faktory ovlivňující atomizaci jsou fyzikální vlastnosti rozptylované fáze (kapaliny — paliva) a fáze již je vystavena (vzduchu nebo jinému plynu). Jsou to *hustota*, *viskozita* a *povrchové napětí*, avšak tyto vlastnosti nelze ovlivnit volbou technologie, a proto je provedeno jen krátké nastínění problematiky. [23]

Viskozita a povrchové napětí značně ovlivňují velikost kapek ve spreji. Povrchové napětí u kapalin s rostoucí teplotou klesá a tím snáze se kapalina roztrhne na jednotlivé kapky. Viskozita také ovlivňuje tvar spreje za tryskou a vznik přirozených nestabilit v proudění kapaliny. Prvotní zvýšení viskozity vytváří jemný film na stěnách trysky, čímž dojde ke snížení tření a má tedy kladný vliv. Dalším zvyšováním viskozity však průtok kapaliny klesá a při opakovaném zvyšování dojde ke změně chtěného kuželovitého tvaru spreje na přímý proud velkých kapek případně dlouhých provazců. Viskozita s rostoucí teplotou klesá, a tak se snažíme její nepříznivý vliv minimalizovat předehřevem kapalin. [23]

3.4 Vliv kvality povrchu trysky na její funkčnost

K posouzení vlivu drsnosti povrchu obtékaných stěn na funkčnost tlakové vířivé trysky byla provedena podrobná rešerše s použitím různých klíčových slov pomocí vyhledávacích nástrojů *Primo*, *Google Scholar*, *ScienceDirect* a dalších, avšak nebyly nalezeny vhodné vědecké publikace věnující se přímo této problematice. Dosažené výsledky budou uvedeny v následujících odstavcích.

Byly nalezeny dvě studie, které o tomto tématu velmi detailně avšak vzdáleně pojednávají. Konkrétně to byla studie [50], která zkoumala vliv drsnosti povrchu na funkčnost lavalových dýz pracujících s dusíkovým plynem za použití *CFD code FLUENT verze 6.3*. Druhá studie [51] zkoumala trysky typu organ-pipe s šesti různými drsnostmi vnitřních povrchů, avšak jak již z názvu vyplývá, tyto trysky jsou součástí varhan, což je značně odlišné použití od zadání práce a výsledky nelze je aplikovat pro rozprašování kapaliny.

Zdroj, který se této problematice věnuje i když pouze částečně bez přesnějších konkrétních informací, je konferenční příspěvek [52], který uvádí některé níže popsané závěry věnující se tématu této kapitoly. Z teoretické analýzy učiněné několika vědci uvedenými v [52] vyplývá, že části tlakové vířivé trysky, jmenovitě vstupní tangenciální otvory, vířivá komora a výstupní otvor, způsobují snížení energie proudícího média vlivem třecích ztrát. Konkrétně je uvedeno, že při vyšších hodnotách drsnosti obtékaných stěn a vyšší viskozitě proudící kapaliny ve vířivé komoře, dochází k zvětšení poloměru vzdušného jádra. V důsledku tohoto jevu bude úhel a tloušťka dutého spreje větší. Dále platí, že délka vířivé komory nemá zásadní vliv na třecí ztráty, pokud není výrazně větší ve srovnání s ostatními rozměry trysky. Také byl učiněn závěr, že čím je délka výstupního otvoru větší, tím kapalina musí urazit delší trajektorii, to znamená větší třecí ztráty, které způsobí zvětšení axiální složky výstupní rychlosti a tloušťky dutého kuželovitého filmu, a naopak zmenší tangenciální složky výstupní rychlosti a úhlu dutého kuželovitého filmu.

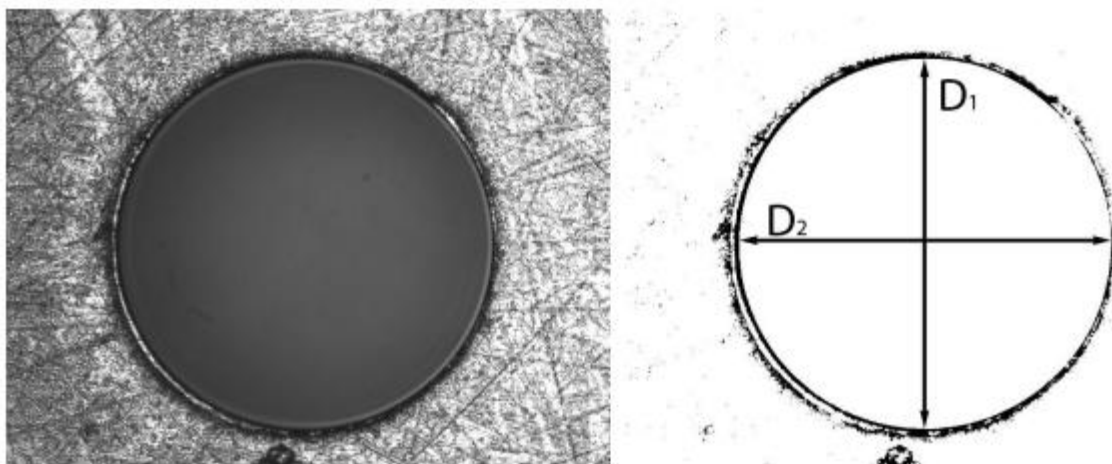
Obecným zjištěním vyplývajícím z toho příspěvku tedy je, že energetické ztráty proudící kapaliny vlivem tření při průchodu výše zmíněných částmi trysky, mají za důsledek snížení úhlu dutého kapalného filmu a zvýšení jeho tloušťky. [52]

Byla prohledána také odborná bibliografie, jako jsou knihy [23, 48], věnující se detailně problematice tlakových vířivých trysek, ale bohužel ani tyto publikace se tématu této kapitoly nijak významně nevěnují. Obsahují pouze krátké zmínky, které potvrzují závěry uvedené v [52].

V doktorské práci [53] se potvrzuje a je uvedeno, že pro zhodnocení vlivu povrchové drsnosti na funkčnost tlakových vířivých trysek, opravdu zatím žádná experimentální studie provedena nebyla a řešení této problematiky je otevřenou otázkou pro další zkoumání.

3.5 Vliv rozměrové a tvarové přesnosti trysky na její funkčnost

Část diplomové práce [84] publikované na VUT, byla věnována vlivu přesnosti výroby na fungování tlakových vířivých trysek. Pro měření základních rozměrů konvenčně vyrobené tlakové vířivé trysky byl použit optický mikroskop Nikon Eclipse E 200. Následně bylo provedeno porovnání experimentálních hodnot s přesnými hodnotami z výrobního výkresu. Výsledná stanovená úchylka výstupního otvoru činila 0,001 mm. Zdroj uvádí, že dodržení výrobních tolerancí se výrazně podepisuje na ceně komponenty a na výsledné kvalitě spreje.



Obr. 14 Porovnání přesného výstupního otvoru trysky s vyrobeným [84]

Taktéž tato práce došla k závěrům, že přesnost výroby může ovlivnit průtok kapaliny výstupním otvorem, neboť jeho průměr do velké míry ovlivňuje kvalitu spreje. Naopak průměr vířivé komory, a tedy i její rozměrové tolerance mají pouze malý vliv. Měření ukázalo, že konvenčně vyrobená tryska splňuje požadavky kladené výkresovou dokumentací. [84]

Obecně platí, že jakákoli odchylka od ideálního tvaru, rozměrových a geometrických přesností jednotlivých částí trysky způsobuje změnu předpokládaného proudění, což má za důsledek zhoršení kvality spreje, nebo jeho úplný rozpad, a proto je nutné dbát na dodržení těchto parametrů v co největší míře.

K dalšímu posouzení vlivu rozměrové a tvarové přesnosti již vyrobené tlakové vířivé trysky na její funkčnost byla provedena podrobná rešerše více jak 200 zdrojů s použitím různých klíčových slov a vyhledávacích nástrojů *Primo*, *Google Scholar*, *ScienceDirect* atd. Byly nalezeny převážně vědecké články zkoumající různé provedení geometrie jednotlivých typů tlakových vířivých trysek a jejich částí. Tyto informace však ne zcela vystihující téma této podkapitoly a věnují se mu pouze okrajově. Proto budou jen krátce shrnuty v následujících odstavcích.

Konkrétně studie [54] se zabývala důsledky malých odchylek v geometrii vnitřních částí palivových trysek způsobených výrobními nepřesnostmi. Jejich vliv na charakteristiky rozprašovacího a průtokového pole byl zkoumán na průhledných tryskách, který byly vyrobeny s malými rozdíly v geometrických parametrech, které představují jakési škálování a naznačují problematiku přesnosti/nepřesnosti výroby. Bylo vizualizováno vnitřní proudění každé trysky a analyzována důležitost jednotlivých částí pro rozprašovací a hydraulické charakteristiky. Konkrétně se jednalo o nepřesnosti průměrů, kuželovitosti a sklonu jednotlivých částí. Aby bylo možné dostatečně tyto geometrické parametry vyhodnotit, bylo k posouzení využito

velmi přesného měření pomocí pro tyto účely vyrobené vláknové sondy, která pracuje na základě ortogonální kolimace ohniskové vzdálenosti v řádech mikrometrů. Byly vyvozeny následující závěry. Tryska s větším průměrem vířivé komory má tendenci snadněji tvořit vzduchové jádro, které bývá navíc delší, než jako tomu je v případě trysky s menším průměrem. Snížením návrhové hodnoty tohoto průměru o 10 % se zvýší kritický tlak potřebný pro vznik vzduchového jádra v ose komory o 50 % a sníží se délka vzduchového jádra o 20 % při použití vysokého tlaku. Dojde také k snížení úhlu rozprašování.

Dále bylo zjištěno, že se průtok výrazně mění podle úhlu kuželovitosti vířivé komory. Zužující se komora způsobuje velké zrychlení protékané kapaliny, kdy dochází k rychlému vytvoření vzduchového jádra a kapalina může lépe proudit. Při použití nízkých vstupních tlaků u této zužující se komory lze dosáhnout dobré kvality rozprašování, kdežto v případě vysokých tlaků je účinnost rozprašování velmi nízká. V případě rozšiřující se vířivé komory je vůbec obtížné vzduchové jádro vytvořit.

V článku [55] bylo detailně zkoumáno, jak mohou vstupní tangenciální otvory ovlivnit kvalitu rozprašování. Byl diskutován počet těchto prvků a také je uvedeno, že tyto části mohou svou délkou, průměrem a přesným tečným napojením na vířivou komoru ovlivnit proudění v kapalině. Práce taktéž hodnotí vliv průměrů a délek u vířivých komor, stejně jako výstupních otvorů na funkčnost trysek. Tyto informace se však neustále opakují a byly uvedeny na základě již citovaných studií ve dvou podkapitolách *3.4 Vliv kvality povrchu trysky na její funkčnost* a *3.5 Vliv rozměrové a tvarové přesnosti trysky na její funkčnost*.

Bohužel nebyly nalezeny další vhodné zdroje věnující se přímo této problematice dopodrobna. Nelze tedy úplně odhadnout do jaké míry ovlivňují rozměrové a tvarové přesnosti trysky její funkčnost a z tohoto důvodu pro posouzení vhodnosti použití jednotlivých zástupců AT při možnosti replikace tlakových vířivých trysek, budou převzaty drsnosti, rozměrové a geometrické přesnosti z kapitoly 7 *Výkresová dokumentace trysky*. Tyto hodnoty odpovídají výsledkům dosažených pomocí stávajících metod výroby tlakových vířivých trysek a budou považovány jako výchozí, ke kterým by se jednotlivé technologie 3D tisku měly přiblížit.

4 Požadavky kladené na tlakové vířivé trysky

V této kapitole budou uvedeny obecně kladené a zároveň touto prací stanovené požadavky na tlakové vířivé trysky typu simplex, které jsou předmětem výroby pomocí AT.

V knize [23] je uvedeno, že ideální palivová tryska by měla splňovat celou řadu charakteristik, avšak z pohledu zadání této práce jsou relevantní pouze požadavky uvedené níže, tedy ty, které lze ovlivnit vhodnou volbou metody 3D tisku a případného post-processingu:

1. Zamezení nestabilit proudění (lze do jisté míry ovlivnit drsností povrchu výtisku)
2. Nízká cena a nízká hmotnost
3. Nízkoenergetické zařízení (k provozu nevyžaduje vysoké nároky na výkon čerpadla)
4. Možnost snadné údržby, jednoduché výměny v případě oprav
5. Nízká náchylnost k porušení během výroby, instalace a provozu
6. Rovnoměrné radiální a obvodové rozstřikování paliva (ovlivnitelné rozměrovou a tvarovou přesností výroby)

Konkrétní pro zadání práce vybraná tlaková vířivá tryska typu simplex a její přesné rozměry, výrobní tolerance, geometrické tolerance a drsnosti povrchu atd. jsou stanoveny výkresovou dokumentací v kapitole 7 *Výkresová dokumentace trysek*.

Jak již bylo uvedeno tři nejdůležitější části trysky, které výrazně ovlivňují její funkčnost jsou: *tečné tangenciální otvory*, *vířivá komora* a *výstupní otvor*. U těchto zmíněných prvků je důležité v co největší míře dodržet zadané rozměry (především průměry) společně s danými tolerancemi a geometrické požadavky (kruhovitost, válcovitost, kuželovitost, tečnost tangenciálních otvorů atd.), neboť i malá odchylka způsobuje změnu proudění paliva a následnou nestabilitu kapalného filmu. U vytisknuté komponenty je také nutné sledovat hodnotu drsnosti povrchu obtékaných částí, která je daná výkresovou dokumentací trysky a má hodnotu $R_a = 1,6 \mu\text{m}$. Nejnížší požadovaná drsnost povrchu však je $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ a tato hodnota bude brána jako určující, ke které by se měly výsledky AT přiblížit. Obecně platí, že čím vyšší bude drsnost povrchu na vnitřních obtékaných plochách trysky, tím vyšší budou hydraulické ztráty, a tedy i nižší účinnost přeměny tlakové energie na kinetickou, což se projeví na vyšší energetické náročnosti trysky (vychází z Bernoulliho rovnice).

Zde popisované tlakové vířivé trysky pracují s provozními tlaky cca 1,5 MPa a hmotnostními průtoky okolo 9 kg/h.[49] Materiál, z něhož bude tryska vyrobena, musí tyto provozní stavy vydržet, zůstat *soudržný* a *neporušený*, a proto důležitými požadavky jsou *pevnost*, *houževnatost*, *vysoká otěruvzdornost vůči proudící kapalině* a *odolnost vůči abrazi*. Původní materiál, z kterého byla dříve vyrobena touto prací přejatá tlaková vířivá tryska, je ocel 1.4028¹, jejíž mez pevnosti v tahu je $R_m = 880 \text{ MPa}$, mez kluzu $R_e = 550 \text{ MPa}$, smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 650 \text{ MPa}$ a modul pružnosti $E = 200 \text{ GPa}$. [56] Tyto pevnostní charakteristiky, budou brány jako orientační pro posouzení vhodnosti použití jednotlivých metod AT pro výrobu tlakových vířivých trysek. [23, 48, 57] V neposlední řadě musí materiál, z něhož je tryska vyrobena, být *chemicky odolný*, aby nedocházelo k narušování povrchu trysky nežádoucími chemickými reakcemi s proudícím palivem, kterým v tomto případě je Jet A-1 (kerosin). [23, 48, 49]

¹ Tuto informaci poskytl vedoucího práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

5 Potenciálně vhodné technologie pro výrobu trysky

V kapitole 2.2 *Tisk — produkce* bylo uvedeno 7 základních skupin AT a jejich prvotní posouzení pro výrobu tlakových vířivých trysek. Skupiny *Sheet Lamination*, *Direct Energy Deposition*, *Material Extrusion* a *Vat photopolymerization* byly již vyřazeny z důvodů uvedených na konci příslušné podkapitoly věnující se uvedeným technologiím. Následující kapitola se věnuje těm zbývajícím, a to konkrétně *Powder Bed Fusion*, *Material Jetting* a *Binder Jetting*. Pozornost je směřována hlavně na jejich nejrelevantnější zástupce pro splnění zadání práce. Tyto technologie budou detailně rozebrány a případně popsány jejich odlišnosti od obecně platných informací uvedených u daných technologických skupin.

5.1 Zástupci Powder Bed Fusion

Informace uvedené u skupiny metod v kapitole 2.2.2 *Powder Bed Fusion (PBF)* jsou obecně platné pro všechny její zástupce. Princip tisku jednotlivých technologií se tedy shoduje s principem tisku skupiny a případné odlišnosti jsou uvedeny u každého zástupce. Dále budou diskutovány rozměrové přesnosti a výsledky dosahované uvedenými zástupci.

5.1.1 Rozdíl mezi Selective Laser Sintering a Selective Laser Melting

Před podrobnou charakterizací jednotlivých zástupců PBF, bude provedeno rozdělení do dvou skupin podle toho, do jaké míry tyto metody natavují tiskový prášek.

Technologie, které ve svém názvu obsahují slovo *Sintering*, ne zcela roztavují tiskový prášek, ale pouze jej nahřívají na teplotu, při které dochází ke sloučení materiálu na molekulární oblasti. U těchto technologií lze kontrolovat hodnotu pórovitosti materiálu.

Technologie obsahující slovo *Melting*, provádí úplné roztavení tiskového prášku na homogenní části o teplotě tavení. Dochází k vytvoření stejnorodého materiálu. Užití těchto metod je vhodnější v případě tisku pouze z jednoho materiálu, který není slitinou kovů o různých teplotách tavení. [58]

5.1.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Prvním zástupcem skupiny PBF je technologie SLS, která využívá, jako zdroj tepla laser ke spékání nejčastěji plastových materiálů. Princip tisku SLS je stejný jako u PBF, avšak pro tvorbu komponent touto metodou existují jistá pravidla a doporučení, rozebraná v následujícím odstavci, díky kterým můžeme dosáhnout značně lepších výsledků.

Minimální šířka stěn při použití SLS se pohybuje kolem 0,7–2 mm. Otvory se navrhují s průměrem větším než 1,5 mm. Základní rozměrová tolerance SLS se pohybuje kolem $\pm 0,3$ mm až $\pm 0,05$ mm. Tato technologie neumožňuje tvorbu přesných hran. Namísto nich bude vytisknut rádius $\pm 0,4$ mm. Při tvorbě uzavřených dutin je nutné vytvořit otvory pro odebrání nespojeného prášku.

Jelikož technologie SLS spéká materiál při vysokých teplotách, vznikají nežádoucí jevy jako je smršťování a zkroucení výtisku vlivem tepelné dilatace. Proto se provádí předtisková analýza, kdy jsou rozměry modelu o 3–5 % zvětšeny za účelem kompenzace smršťování. Zkroucení se snažíme zabránit zvýšením pevnosti komponenty pomocí žebrovaním nebo změnou orientace. [60]

SLS vytváří pevné vazby mezi jednotlivými vrstvami. Z tohoto důvodu se mechanické vlastnosti komponenty blíží vlastnostem izotropního materiálu. Následující Tab. 1 uvádí pevnostní charakteristiky dvou nejpoužívanějších polyamidových prášků PA 12 a Nylon 12. [62]

Tab. 1 Pevnostní charakteristiky materiálů PA 12 a Nylon 12 [62]

| | Ve směru X-Y | Ve směru Z | Práškový PA12 |
|-------------------------------------|--------------|------------|---------------|
| Pevnost v tahu [MPa] | 48 | 42 | 3555 |
| Modul pružnosti v tahu [MPa] | 1650 | 1650 | 1270–2600 |
| Prodloužení do lomu [%] | 18 | 4 | 120–300 |

Z uvedených doporučení a přesností vyplývá, že použití metody SLS k výrobě tlakových vířivých trysek není možné. Proto se tato práce dále bude zabývat ostatními zástupci PBF.

5.1.3 Micro laser sintering (MLS)

Technologie MLS byla představena v roce 2003, jako modifikace technologie SLS, která s sebou přináší několik inovací, popsanych ve studii [64]. Konkrétně to je nová technika a zařízení pro manipulaci s kovovými prášky o velikostech zrn v mikrometrech a nová technologie laserového slinování používající Q-spínání. Tyto úpravy mají za důsledek zlepšení celkového rozlišení, které je u kovových výtisků menší než 30 μm a minimální drsnost povrchu $R_a = 1,5 \mu\text{m}$.

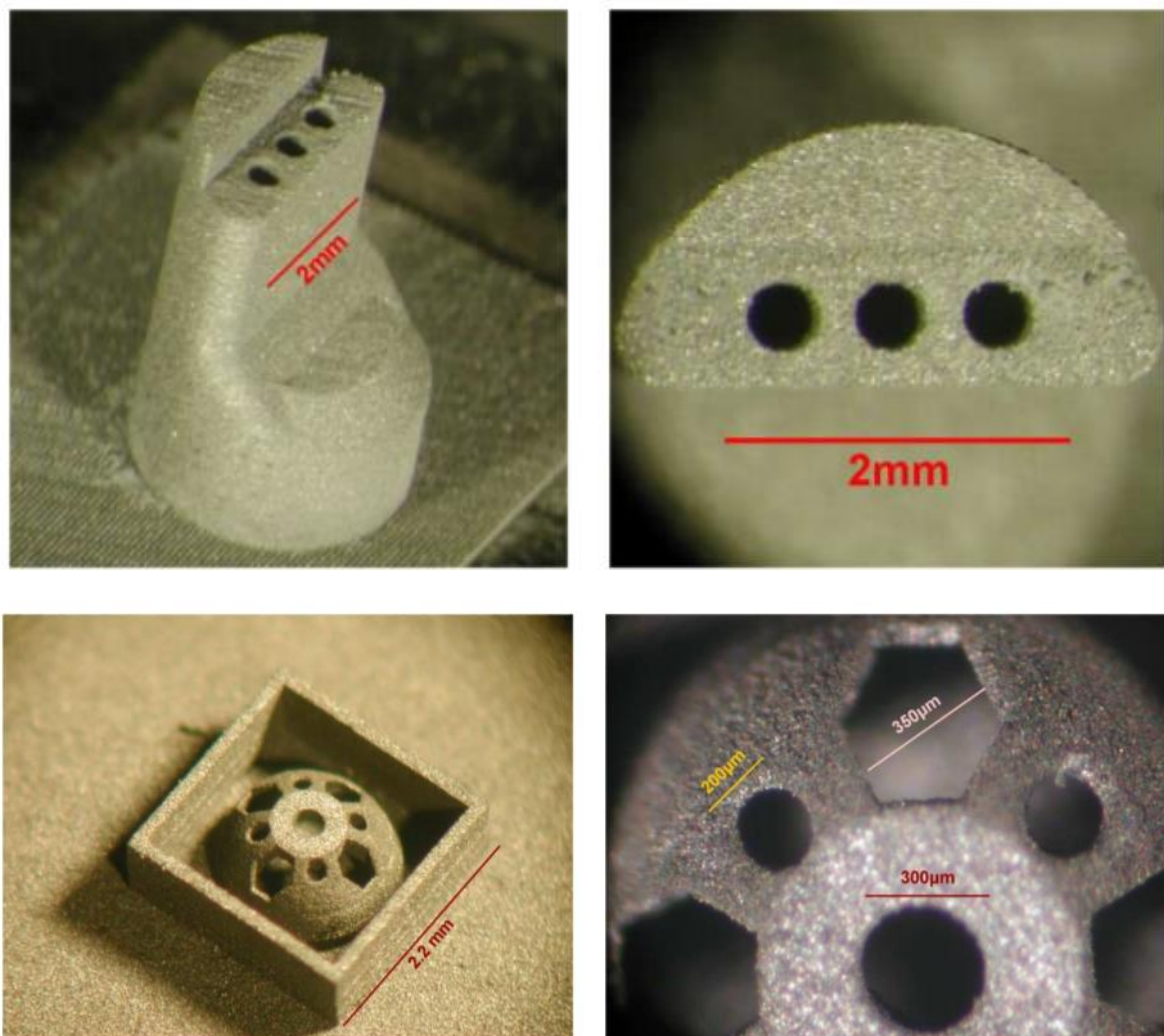
Stejně jako SLS využívá MLS ke spékání lasery, avšak mnohem více technologicky pokročilé. V konkrétním případě této studie jde o laser Q-switched Nd:YAG o vlnové délce $\lambda = 1064 \text{ nm}$ a průměrném výkonu 0,1–10 W v TEM₀₀ módu, který používá Q-spínání. Jde o krátké laserové impulzy o frekvencích mezi 0,5–100 kHz. Laser do tiskové komory prochází přes speciální křemenné sklo.

S vzrůstajícími požadavky na přesné spékání materiálů, roste také nutnost přesné detekce tohoto jevu. K tomuto účelu se používá snímač ScanLan s ohniskovou vzdáleností 54 mm a skenovacím polem o rozměrech (23 × 23) mm v kombinaci se softwarem IVS STL Converter (Version 1.0), který byl navržen přesně pro tyto účely.

Díky moderním technologiím je možné vyrobit více jemnozrnné prášky, které dosahují velikostí zrn menších než mikrometr, což přináší výhodu přesnějšího tisku, ale také vyžaduje inovaci v technice a zařízení pro manipulaci s těmito prášky. Aby nedocházelo k nežádoucí oxidaci materiálu během tisku, je nutné regulovat pracovní atmosféru. Celý proces tisku je umístěn do hermeticky uzavřené tiskové komory s molekulární vakuovou pumpou. Používá se vakuování na podtlak 10^{-3} Pa a případně také ochranné atmosféry se sníženým tlakem od 10^{-3} Pa až do 400 kPa. Součástí inovace je také podávací zařízení na prášek v podobě speciální kovových válců.

Výsledkem tisku, pomocí aparatury popsané výše, je hrubý povrch se střídajícími se drobnými krátery hlubokými okolo 5–10 μm a výstupky vysokými 1–3 μm . Hustota vytisknutého materiálu se pohybuje kolem 40–75 % původního materiálu, případně při použití záruvzdorného materiálu s nižšími teplotami tavení dosahuje hodnot 90 % a více.

Pomocí této metody byly vyrobeny následující výtisky na Obr. 15 z titanových zrn menších než $30\text{ }\mu\text{m}$. Jsou zde uvedeny jako demonstrační příklad možností výroby MLS, při tvorbě komplexní geometrie a velmi přesných kruhových otvorů o velikosti menší než 2 mm. [64, 66]



Obr. 12 Příklad možností MLS [64]

Zdroj [68] uvádí, že při použití materiálů jako: ocel 316L, molybden, titan nebo wolfram, dosahuje MLS přesnosti výroby pohybující se od $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ do 10 mm. Technologie umožňuje tisk stěn o minimální tloušťce $32\text{ }\mu\text{m}$. Uvedená dosahovaná drsnost po výtisku je $R_a = 2,0\text{ }\mu\text{m}$; $R_z = 13\text{ }\mu\text{m}$ a po post-processingu $R_a = 0,7\text{ }\mu\text{m}$; $R_z = 2,7\text{ }\mu\text{m}$. Bohužel se nepodařilo nalézt pevnostní charakteristiky výtisků z kovových materiálů uváděných zdrojem [68], nebo jejich slitin při použití této metody.

Studie [69] hliníkových slitin v kombinaci s technologií SLS na úrovni mikro, což v konečném důsledku lze považovat za technologii MLS, uvádí že při optimálních výrobních podmínkách při použití kombinace Al5Cu a Al5Cu0.5Mg ke spékání, lze dosáhnout pevnosti v ohybu rovné 466 MPa.

Studie [64] potvrdila možnost použití MLS pro výrobu funkčních komponent, srovnatelných materiálových kvalit dosahovaných jinými technologiemi jako například injekčním vstřikováním.

Z obecných informací uvedených v této podkapitole vyplývá, že použití této metody pro výrobu tlakových vířivých trysek je potenciálně uskutečnitelné, avšak pro jednoznačné rozhodnutí by bylo vhodné danou komponentu vyrobit a otestovat.

5.1.4 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Princip fungování technologie DMLS je velmi podobný MLS. Rozdílem však je, jak již z názvu vyplývá, že DMLS slouží k tisku pouze kovových komponent, kdežto použití technologie MLS má širší portfolio materiálů, jako kov, keramiku a sklo.

Technologii DMLS využívá například tiskárna *EOS M 290*, která je určena pro efektivní průmyslovou výrobu vysoce kvalitních kovových komponent. Je opatřena Yb-fiber laserem o výkonu 400 W, který zajišťuje homogenní vlastnosti výtisku pomocí velmi stabilního paprsku. K regulaci chodu laseru slouží vysoko-rychlostní skener F-theta-lens s průměrem zaostření 100 μm dosahující rychlostí skenování až 7 m/s. Součástí tiskárny je také komplexní monitorovací sada EOSTATE skládající se z pěti různých monitorovacích systémů, které jsou schopny v reálném čase provádět kontrolu kvality všech výrobních a kvalitativních údajů. *EOS M 290* je opatřena intuitivním softwarem CAM tool *EOSPRINT*, který zajišťuje optimalizace CAD dat pomocí celé řady nástrojů použitelným na míru dané aplikaci. Stavební prostor o rozměrech (250 × 250 × 325) mm umožňuje tisk značně velkých součástí, což je další výhodou DMLS. [70]

Tiskárna *EOS M 290* je schopna plynulého tisku z více než desíti kovových materiálů. Konkrétně se jedná o různé typy ocelí a slitiny titanu, hořčíku, hliníku, kobaltu, niklu. [71] Byly zvoleny dva materiály pro posouzení možnosti výroby tlakových vířivých trysek.

První vybraný práškový materiál *EOS Titanium Ti64* je lehká slitina Ti6Al4V používaná k výrobě funkčních komponent určených pro biomedicínské implantáty, motorsport a také kosmický průmysl. [72] *EOS Titanium Ti64* v kombinaci s tiskárnou *EOS M 290* je schopen tvořit vrstvy o tloušťce 30 μm s rychlostí 5 mm^3/s (18 cm^3/h). Hustota vytisknutého materiálu se pohybuje okolo 4,41 g/cm^3 . Drsnost vytisknutého povrchu závisí na konkrétní orientaci komponenty, avšak přibližná hodnota je $R_a = 5\text{--}9\text{ }\mu\text{m}$ a $R_z = 20\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$. Uváděná tvrdost tohoto materiálu je 320 HV5.

Následující Tab. 2 uvádí pevnostní charakteristiky tohoto materiálu po provedení tepelného zpracování nahřátí na 800 °C po dobu 2 hodin v netečné atmosféře argonu. Hodnoty představují průměry určené z horizontálních a vertikálních vzorků samostatně. Jsou uvedeny za pokojové teploty a byly experimentálně zjištěny podle ISO 6890-1 A14. [73]

Tab. 2 Pevnostní charakteristiky *EOS Titanium Ti64* — přizpůsobeno z [73]

| | Výtisk orientovaný | |
|-----------------------------------|--------------------|------------|
| | Horizontálně | Vertikálně |
| Mez pevnosti v tahu — R_m [MPa] | 1055 | 1075 |
| Mez kluzu — $R_{p0,2}$ [MPa] | 945 | 965 |
| Prodloužení do lomu [%] | 13 | 14 |
| Kontrakce — Z [%] | > 25 | > 25 |

Druhým vybraným tiskovým práškem je *EOS CobaltChrome MP1*, superslitina kobaltu, chromu a molybdenu, mající vynikající mechanické vlastnosti, dobrou odolnost proti korozi a teplotní odolnost až do 600 °C. Tento materiál se používá v biomedicínských aplikacích stejně jako v leteckém průmyslu. U menších výtisků se odhaduje uvedená přesnost přibližně $\pm 20\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$, kdežto u větších je $\pm 20\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$. Je doporučeno navrhovat stěny širší než 0,3 mm. Při tisku 20 μm vysokých vrstev rychlostí 1.6 mm³/s (5.1 cm³/h) je drsnost povrchu rovna $R_a = 4\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$, $R_z = 20\text{--}40\text{ }\mu\text{m}$, avšak tyto hodnoty se v závislosti na orientaci komponenty a použité měřicí metodě liší. Pomocí dokončovací metody leštění lze snížit drsnost až na $R_z < 1\text{ }\mu\text{m}$.

Následující Tab. 3 uvádí orientační mechanické vlastnosti EOS CobaltChrome MP1 za pokojové teploty 20 °C přímo po výtisku a Tab. 4 mechanické vlastnosti stejného materiálu, ale tepelně zpracovaného 6 hodin ve vysokoteplotní peci zahřáté na 1150 °C pod ochranou atmosférou argonu. Uvedené hodnoty byly experimentálně změřeny podle ISO 6892-1:2009 (B) Annex D. [74]

Tab. 3 Pevnostní charakteristiky EOS CobaltChrome MP1 bez dalšího zpracování
— přizpůsobeno z [74]

| | V horizontálním směru X-Y | Ve vertikálním směru Z |
|---|------------------------------|---------------------------|
| Mez pevnosti v tahu — R_m [MPa] | 1350 ± 100 | 1200 ± 150 |
| Mez kluzu — $R_{p0,2}$ [MPa] | 1060 ± 100 | 800 ± 100 |
| Prodloužení do lomu [%] | 11 ± 3 | 26 ± 4 |
| Modul pružnosti — E [GPa] | 200 ± 20 | 190 ± 20 |

Tab. 4 Pevnostní charakteristiky EOS CobaltChrome MP1 tepelně zpracovaného
— přizpůsobeno z [74]

| | V horizontálním směru X-Y | Ve vertikálním směru Z |
|---|------------------------------|---------------------------|
| Mez pevnosti v tahu — R_m [MPa] | 1100 ± 100 | 1100 ± 150 |
| Mez kluzu — $R_{p0,2}$ [MPa] | 600 ± 50 | 600 ± 50 |
| Prodloužení do lomu [%] | Min. 20 | Min. 20 |
| Modul pružnosti — E [GPa] | 200 ± 20 | 190 ± 20 |

Tvrdost tohoto materiálu podle Rockwella je 35–45 HRC, změřené podle EN ISO 6508-1 na leštěném povrchu. Tato hodnota se může lišit podle použitého zkušební vzorku. [74]

Z výše uvedených informací vyplývá, že použití technologie DMLS v kombinaci s tiskárnou EOS M 290, která je schopna pracovat s práškovými materiály EOS Titanium Ti64 a EOS CobaltChrome MP1, je pro výrobu tlakových vířivých trysek potenciálně použitelné.

5.2 Zástupci Material Jetting

Obecně dosahované výsledky této skupiny metod byly již uvedeny, avšak vyplývá z nich, že nejsou dostačující pro tvorbu tlakových vířivých trysek. Výjimkou však je poměrně nová technologie *NanoParticle Jetting*, které se věnuje následující podkapitola.

5.2.1 NanoParticle jetting (NPJ)

Společnost XJet uvedla v listopadu roku 2016 na trh novou technologii *NanoParticle Jetting*. Jejich 3D tiskárny XJet Carmel 1400 a XJet Carmel 700 způsobily revoluci v aditivních technologiích, neboť jsou schopny tisku komponent s tloušťkou vrstev až pod $2\text{ }\mu\text{m}$ s převratnou přesností.

NPJ využívá kapalinu s keramickými nanočásticemi a s nanočásticemi určenými pro stavbu podpor. Pomocí tiskové hlavy se nanáší extrémně tenká vrstva kapek. Vysoká teplota uvnitř komory způsobí vypaření kapalné fáze a zůstává pouze pevná fáze v podobě výtisku. [27]



Obr. 13 Výsledky dosažené pomocí NPJ [75]

Pro bližší představení byla vybrána tiskárna XJet Carmel 1400, disponující 24 tiskovými hlavami s 512 tryskami, nanášející kov nebo keramický materiál Zirconia ZrO_2 rychlostí $1\text{--}1,5\text{ mm/hod}$. Výška tisknutých vrstev u kovu se pohybuje okolo $3\text{--}8\text{ }\mu\text{m}$ a v případě použití keramiky okolo $10\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$. Maximální velikost vyrobených komponent je stanovena stavební prostorem, který má rozměry $(500 \times 280 \times 200)\text{ mm}$. Výrobce uvádí, že přesnost NPJ v kombinaci s touto tiskárnou je přibližně $20\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$ v případě rozměrů komponent do 50 mm a $50\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ pro větší součásti. Tyto hodnoty však závisí na celkové geometrii a orientaci komponenty, stejně tak jako na konkrétních výrobních podmínkách. Minimální uváděná velikost detailů je $100\text{ }\mu\text{m}$. Hustota výtisku se pohybuje okolo 6 g/cm^3 ($> 99,9\%$), tvrdost je nižší než 12 GPa a drsnost povrchu je menší než $20\text{ }\mu\text{m}$. Uvedené hodnoty odpovídají měření provedenému společností XJet v laboratorních podmínkách. Mezi výrazné výhody této technologie patří extrémně malé smršťování výtisku vlivem tepelné dilatace chladnoucího naneseného materiálu a jeho izotropní chování. [76, 77]

Bohužel výrobce neuvádí další bližší informace o pevnostních charakteristikách výtisků z materiálu Zirconia ZrO_2 a jestli je technologie NPJ schopna tvorby přesných geometrických tvarů, jako např. velmi malých otvorů, které jsou vyžadovány pro tvorbu tlakových vířivých trysek. Pro bližší posouzení vhodnosti této metody by musela být provedena zkušební výroba, nebo případná studie věnující se této problematice. Z těchto důvodů použití NPJ při výrobě tlakových vířivých trysek nebude dále uvažováno.

5.3 Zástupci Binder Jetting (BJ) — tryskání pojiva

Jak bylo uvedeno, skupina BJ a její stejnojmenný zástupce je až 10× cenově výhodnější v porovnání s DMLS/SLM. Z tohoto důvodu bude provedeno posouzení použitelnosti tohoto zástupce pro výrobu tlakových vířivých trysek. Způsob tisku je stejný, jako u skupiny BJ. V následujících odstavcích budou uvedeny podrobnější doplňující informace.

Nevýhodou použití této metody jsou horší mechanické vlastnosti. Únavová a lomová pevnost stejně jako relativní prodloužení do lomu jsou nejvíce ovlivněny vnitřní pórovitostí materiálu, která je při použití BJ značně vysoká. Z toho důvodu se provádí dodatečné zpracování výtisku v části post-processing, pomocí metod *infiltration* a *sintering*.

V případě *infiltration* je vytisknutá komponenta umístěna do pece, kde je následně tiskové pojivo vypáleno. V místech vypáleného pojiva vznikají póry. Obvyklá pórovitost po provedení této procedury je přibližně 80 % a z toho důvodu se používá bronz k infiltrování pórů pomocí kapilárních jevů. Výsledkem je 90 % hutný materiál a tomu odpovídající lepší mechanické vlastnosti. [42]

Druhým způsobem je *sintering*, kdy je opět vytisknutá komponenta umístěna do pece a tiskové pojivo je vypáleno. Společně s tím dojde k spečení zbylých kovových částic. Výsledkem je výtisk se značně nižší pórovitostí. Zdroj [42] uvádí, že po provedení této dokončovací metody se může BJ dosáhnout až 97% hutného materiálu a tedy opět výrazně lepších mechanických vlastností. Porovnání těchto dvou dokončovacích metod s technologiemi DMLS a SLM při použití oceli 316L je uvedeno v následující Tab. 5.

Tab. 5 Porovnání BJ při použití dokončovacích metod s DMLS/SLM pro ocel 316L
— přizpůsobeno z [42]

| | BJ | BJ | DMLS/SLM |
|-------------------------|----------|--------------------|----------|
| Post-processing | Sintered | Infiltrace bronzem | — |
| Mez kluzu — R_e [MPa] | 214 | 283 | 470 |
| Prodloužení do lomu [%] | 34 | 14,5 | 40 |
| Modul pružnosti [GPa] | 165 | 135 | 180 |

V případě požadavku ještě lepších vlastností a téměř nulové vnitřní pórovitosti se používá speciální dokončovací metoda *Hot isostatic pressing (HIP)*, kdy je vytisknutá součást opět vystavena zvýšené teplotě, ale také zvýšenému izostatickému tlaku inertního plynu — nejčastěji argonu. [42, 78]

Použití těchto metod post-processingu může však být zdrojem komplikací, a to v případě, že se materiál nataví natolik, až dojde ke zborcení některých převislých částí výtisku pod vlastní tíhou. Druhá možnost je, že při zpětném ochlazování a tunutí komponenty dochází ke smršťování výtisku a případnému nežádoucímu zkroucení. [42]

Zdroj [42] dále uvádí, že BJ je schopna tisknout, jak z kovových tak i keramických materiálů. Následující Tab. 6 uvádí obecně dosahované výsledky při jejich použití v kombinaci s touto technologií.

Tab. 6 Obecně dosahované výsledky BJ — přizpůsobeno z [42]

| Materiál | Kovy | Keramika (písek) |
|--|---|--|
| Rozměrová přesnost [mm] | $\pm 0,2$ | $\pm 0,3$ |
| Typické rozměry stavebního prostoru [mm] | (400 × 250 × 250) až (800 × 500 × 400) | (800 × 500 × 400) až (220 × 1200 × 600) |
| Běžná výška vrstev [μm] | 50 | 200–400 |

Technologii BJ využívá například komerčně dostupná tiskárna DM P2500, která má potenciální využití ve vesmírném programu společnosti Honeywell. Výrobní společnost Digital Metal uvádí, že DM P2500 je schopna kontinuálního tisku o rychlosti 100 cm³/hod s velmi hladkým povrchem s průměrnou hodnotou drsnosti $R_a = 6 \mu\text{m}$. [79, 80] Při použití dokončovacích metod je možné dosáhnout až $R_a = 3 \mu\text{m}$. [42] Výška vrstev se pohybuje okolo 42 μm . Tiskárna disponuje automatickým kalibračním systémem stavební komory o rozměrech (203 × 180 × 69) mm. Tisk probíhá za pokojových teplot a není nutné používat ochranou atmosféru nebo netečné plyny. Velkou výhodou je velmi malé množství odpadního materiálu, neboť nespojené prášky lze znovu použít bez výrazné změny vlastností, a tak snížit finální cenu výrobku. [79–81]

Protože tepelné zpracování komponent probíhá až v části post-processing, je možné proces tisku přizpůsobit širší škále materiálů. [79, 80] Konkrétně DM P2500 je schopna výroby z tří kovových zástupců: oceli 316L, oceli 17-4PH a slitiny Ti6Al4V. Jejich charakteristiky jsou uvedeny v následující Tab. 7.

Tab. 7 Mechanické vlastnosti materiálů pro DM P2500 — přizpůsobeno z [81]

| Materiál | Mez pevnosti R _m [MPa] | Smluvní mez kluzu R _{p0,2} [MPa] | Prodloužení [%] | Tvrdost | |
|----------|--------------------------------------|--|--------------------|---------|--------|
| 316L | 520 | 180 | 50 | 55 HRB | — |
| 17-4PH | 900 | 730 | 6 | — | 25 HRC |
| Ti6Al4V | 890 | 790 | 8 | — | 25 HRC |

Zdroj [82] uvádí, že při použití výše uvedené tiskárny nelze dosáhnout přesně vytisknutých hran, místo nich bude vytvořen rádius o poloměru 35 μm . Doporučená tloušťka stěn je větší než 300 μm s minimální hodnotou pohybující se okolo 150 μm . Výrobcem je také doporučeno navrhovat díry o rozměru větším než 200 μm . Na Obr. 17 je uveden demonstrační výtisk kombinace BJ a DM P2500, který potvrzuje výše uvedené informace.



Obr. 14 Demonstrační příklad možností BJ v kombinaci s DM P2500 [83]

Použití této metody pro výrobu tlakových vířivých trysek s největší pravděpodobností není možné, neboť minimální velikost vytisknutých děr se pohybuje okolo 200 μm [82] a výše uvedené výrobní přesnosti nejsou dostačující pro výrobu tlakových vířivých trysek. Případná kombinace BJ a dokončovacích metod pomocí konvenčního způsobu výroby je diskutabilní, ale nelze jednoznačně rozhodnout, zda by navýšení nákladů o tyto metody post-processingu vyrovnalo cenovou výhodnost této AT.

6 Výběr vyhovující metody pro replikaci

Tato kapitola se bude zabývat finálním vyhodnocením posledních AT, které ještě nebyly vyřazeny v průběhu práce. Následující Tab. 8 shrnuje dostupné informace o zbývajících použitelných technologiích popsanych v předchozí kapitole 5 *Potenciálně vhodné technologie pro výrobu trys* a porovnává je s informacemi dostupnými o tlakových vířivých tryskách vyrobených konvenčním způsobem uvedených v kapitole 4 *Požadavky kladené na tlakové vířivé trysky*.

Tab. 8 Porovnání konvenčně vyrobené trysky s možnostmi jednotlivých AT

| | Tryska | MLS | DMLS | | BJ |
|--------------------------------|-------------|------------------|-------------------|----------------------|---------|
| Materiál | Ocel 1.4028 | Obecné informace | EOS Titanium Ti64 | EOS CobaltChrome MP1 | Ti6Al4V |
| R_m [MPa] | 880 | — | 1060 | >1100 | 890 |
| R_e [MPa] | 550 | — | — | — | — |
| R_{p0,2} [MPa] | 650 | — | 950 | >600 | 790 |
| E [GPa] | 200 | — | — | 200 | — |
| Prodloužení do lomu [%] | — | — | 13 | >11 | 8 |
| Přesnost [μm] | ± 20 | ± 5 | — | ± 20–50 | ± 200 |
| Drsnost Ra [μm] | 0,4 | 0,7 | 5–9 | 4–10 | 3–6 |
| Drsnost Rz [μm] | — | 2,7 | 20–50 | 20–40 | — |

V důsledku nedostatku informací o jednotlivých metodách, nebylo možné všechny buňky v Tab. 8 vyplnit. Tento fakt je nejspíše způsoben ochranou informací jednotlivých výrobců před konkurencí na trhu, nebo jejich neznalostí v tomto směru. Nutno podotknout, že jednotlivé hodnoty se mohou lišit podle celkové geometrie, orientace daného výtisku, přesnosti kalibrace tiskového zařízení, podle dané měřicí aparatury atd.

I přes uvedené komplikace bylo provedeno porovnání jednotlivých metod mezi sebou. Jako nejperspektivnější skupina AT pro výrobu tlakových vířivých trysek se jeví PBF, neboť se do tohoto nejužšího výběru vhodných technologií dostali dva její zástupci MLS a DMLS. V minulosti pomocí této skupiny byla již vyrobena tryška do tryskového motoru, což jen potvrzuje její použitelnost k účelu zadání práce.

Ze srovnání je patrné, že v oblasti drsnosti povrchu se technologie MLS s hodnotou $R_a = 0,7 \mu\text{m}$ nejvíce přiblížila požadavku kladenému na tlakovou vířivou tryšku s hodnotou $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, avšak žádná z uvedených technologií nebyla schopna tomuto požadavku plně vyhovět. Přesnost výtisku MLS se pohybuje $\pm 5 \mu\text{m}$ a je dostačující. V kapitole 5.1.3 *Micro laser sintering* (MLS) jsou uvedeny fotografie výtisků potvrzujících možnost tvorby velmi malých přesných otvorů, což se dá považovat za potencionální důkaz schopnosti MLS vytvořit kvalitní tangenciální vtokové otvory tlakové vířivé trysky. Uvedené informace však nejsou svázány s žádnou dostupnou průmyslovou tiskárnou. Jsou pouze experimentální studií této metody popsané v článcích [64, 66], které bohužel neuvádí konkrétní informace o pevnostních charakteristikách vytisknutých komponent, avšak potvrzují schopnost MLS tvořit funkční komponenty srovnatelných kvalit s technologií injekčního vstřikování. Závěrem tedy je,

že potenciál této metody zůstává otevřen další experimentální studii, která požadovanou trysku vyrobí, otestuje a finálně potvrdí její použitelnost.

Druhý zástupce skupiny PBF, který se jeví jako nejlepší kandidát pro výrobu tlakových vířivých trysek, je metoda DMLS. Pomocí průmyslové tiskárny EOS M 290 detailně popsané v kapitole 5.1.4 *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* a tiskového prášku EOS CobaltChrome MP1, popsaného taktéž v této kapitole, lze vytisknout komponenty rychlostí 1,6 mm³/s (5,1 cm³/h) s přesností $\pm 20 \mu\text{m}$, která odpovídá požadavku kladenému na tlakovou vířivou trysku. Dosahovaná uváděná drsnost povrchu je $R_a = 4 \mu\text{m}$, což je řádově 10× větší než drsnost na výrobním výkresu trysky, která je $R_a = 0,4 \mu\text{m}$. Otázkou zůstává nakolik tento faktor ovlivní funkčnost trysky a zda je možné tuto hodnotu snížit pomocí kombinované výroby s konvenčními metodami obrábění, či nikoliv. Pevnostní charakteristiky tiskového materiálu jsou srovnatelné s vlastnostmi trysky v případě modulu pružnosti, který je 200 GPa a mez pevnosti v tahu je dokonce u prášku EOS CobaltChrome MP1 vyšší přibližně o 200 MPa. Tento materiál je schopen prodloužení do lomu o 20 % a uváděná tvrdost podle Rockwella, změřená podle EN ISO 6508-1, je 35–45 HRC.

Jelikož se u zástupce DMLS podařilo nalézt nejvíce konkrétních informací, použitelných pro srovnání s konvenčně vyrobenou tlakovou vířivou tryskou, které jsou navíc až na výjimku drsnosti povrchu vyhovující, byla tato technologie vybrána jako finální kandidát pro možnosti replikace. Učiněný závěr je hypotetický a výsledek by bylo vhodné experimentálně ověřit, tedy trysku vyrobit a otestovat. Tato část měla být předmětem posledního nepovinného úkolu č. 6, který však z časových důvodů a rozsahu práce nebylo možné splnit a je námětem pro další bakalářskou či diplomovou práci věnující se tomu tématu.

7 Výkresová dokumentace trysky

Výkresová dokumentace dvou částí touto prací vybrané tlakové vířivé trysky typu simplex byla vytvořena pomocí programu AutoCAD 2018 na základě informací dodaných vedoucím práce. Výkresy jsou součástí přílohy 1 a 2, které se nachází na zvlášť přiložených listech na konci dokumentu. V programu SOLIDWORKS 2016 byl dále vytvořen 3D CAD model dvou částí trysky obsahující potřebná data pro výrobu skutečné tlakové vířivé trysky typu simplex pomocí 3D tisku. Použitím programu Ashampoo Burning Studio 6 FREE 6.84 byla tyto data vypálena na DVD jako příloha 3, která se nachází v obalu na konci práce na vnitřní straně desek.

DISKUSE

Součástí konečného zhodnocení je diskuse, v níž autor uvádí nedokonalosti této práce, kterých si je vědom, a které mohou sloužit jako námět témat dalších vysokoškolských prací, vědeckých publikací nebo experimentů. V nadcházejících odstavcích jsou shrnuty a je provedeno odůvodnění, proč nebylo možné tyto úkoly nebo jejich části zcela vyřešit.

Bohužel nebylo možné důkladně prověřit vliv drsnosti povrchu vnitřně obtékaných částí tlakových vířivých trysek na její funkčnost, neboť pro tuto rešerši nebyly doposud vytvořeny požadované zdroje. Je tedy na dalších, aby provedli potřebné experimenty a tento problém vyhodnotili.

Součástí stejného úkolu, bylo také provedení rešerše k vlivu rozměrové a tvarové přesnosti na funkčnost zadané trysky. K tomuto tématu se podařilo nalézt pouze minimum informací, neboť opět tento vliv zatím nebyl nijak více zkoumán již publikovanými studiemi.

V neposlední řadě nebylo možné u některých metod provést úplné srovnání dosahovaných výsledků se všemi požadavky kladenými na tlakové vířivé trysky, a to z důvodu neuvádění potřebných informací jednotlivými výrobci 3D tiskáren a jejich příslušenství. Tento fakt je nejspíše zapříčiněn dosahováním horších výsledků než konkurence, nebo neznalostí firem v tomto směru. Stejně tak některé experimentální studie použité jako zdroje v této práci, uvádějí pouze určité jimi zkoumané mechanické vlastnosti, drsnosti, přesnosti atd. a znemožňují tak detailní srovnání. I přes tyto překážky, bylo vyhodnocení metod provedeno a úspěšně nalezeno řešení v podobě dvou potenciálně vyhovujících zástupců aditivních technologií. Konkrétně to jsou Micro Laser Sintering a Direct Metal Laser Sintering, využitelné pro replikaci tlakových vířivých trysek.

Z důvodu již tak velkého rozsahu práce, který počtem slov již přesáhl limit diplomové práce a nedostatku času nebylo možné experimentálně ověřit použitelnost finálně vybraných metod pro možnosti replikace tlakových vířivých trysek. Tato část zadání však byla nepovinná a otázka jejího řešení je otevřená pro další studie.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zhodnotit možnosti AT při použití jejich předních výhod (především nízkých výrobních nákladů a časů) v oblasti výroby tlakových vířivých trysek typu simplex, což jsou velmi přesné funkční konstrukční zařízení často s velikostmi detailů v řádech mikrometrů používané pro rozprašování kapaliny.

Jako první byla představena problematika 3D tisku. Byly definovány základní pojmy a proces 3D tisku rozdělen do tří částí pre-processing, tisk — produkce a post-processing. V kapitole 2.2 *Tisk — produkce* bylo provedeno rozdělení AT dle normy ISO/ASTM 52900:2015 do sedmi základních skupin obsahující většinu dnes existujících metod. Jsou to *Vat photopolymerization*, *Material Extrusion*, *Material Jetting*, *Binder Jetting*, *Direct Energy Deposition* a *Sheet Lamination*, u kterých byly zjištěny základní charakteristiky, výhody, nevýhody a dosahované výsledky, na jejichž základě bylo učiněno prvotní rozhodnutí o jejich použitelnosti pro možnosti zadání. Skupiny *Sheet Lamination*, *Direct Energy Deposition*, *Material Extrusion* a *Vat photopolymerization* byly vyřazeny kvůli konkrétním důvodům uvedených na konci každé příslušné stejnojmenné podkapitoly. V této části práce jsou taktéž představeny již realizovaná řešení replikace, a to konkrétně u skupiny PBF pomocí níž dokonce rozprašovací palivová tryska byla vyrobena a použita v leteckých motorech.

Dále v kapitole 3 *Tlaková vířivá tryska* byla popsána vybraná tlaková vířivá tryska, princip rozprašování kapaliny (tzv. atomizace) a také faktory, které ji ovlivňují. Touto prací byly stanoveny požadavky kladené na potencionálně vytisknutou palivovou trysku, kterým by se jednotlivé technologie 3D tisku měly přiblížit. Pro účely porovnání přesných rozměrů, geometrických tolerancí, drsností povrchu atd. byla v programu AutoCAD 2018 vytvořena výkresová dokumentace dvou částí tlakové vířivé trysky typu simplex, která je jako příloha 1 a 2 vložena na konci práce. Součástí kapitoly 3 *Tlaková vířivá tryska* bylo také provedení rešerše k vlivu drsnosti povrchu a rozměrové a tvarové přesnosti na funkčnost zařízení. Komentář k této problematice byl již učiněn v kapitole *DISKUSE*, a proto nebude opakován.

Po úvodním představení obou témat bylo provedeno opětovné, ale podrobnější zhodnocení v průběhu práce ještě nevyřazených skupin *Powder Bed Fusion*, *Material Jetting* a *Binder Jetting* demonstrované na konkrétních zástupcích. Výsledky tisku byly srovnány s požadavky na vybranou trysku.

Skupina *Material Jetting* obsahuje novou technologii *NanoParticle Jetting*, která umožňuje v kombinaci s tiskárnou XJet Carmel 1400 tisk velmi kvalitních komponent s tloušťkou vrstev až pod 2 μm s převratnou přesností 20–50 μm . Bohužel výrobce neuvádí bližší informace o pevnostních charakteristikách a jestli je tato technologie schopna tvorby přesných geometrických tvarů. Bylo rozhodnuto, že pro bližší posouzení vhodnosti této metody by bylo potřeba tyto informace doplnit, a proto použití NPJ při výrobě tlakových vířivých trysek dále nebylo uvažováno.

Za účelem značného snížení ceny výroby rozprašovacích trysek byla k bližšímu prozkoumání vybrána skupina *Binder Jetting* a její stejnojmenný zástupce, který je až 10× cenově výhodnější v porovnání s DMLS/SLM. Touto technologií disponuje například komerčně dostupná tiskárna DM P2500, která byla detailně popsána společně

s dosahovanými výsledky. Jelikož tato kombinace i při použití různých metod post-processingu používaných ke zlepšení vlastností výtisku, nedokáže v oblasti výrobní přesnosti a drsnosti splnit požadavky tlakových vířivých trysek, použití této metody pro zadání práce s největší pravděpodobností není možné. Případná kombinace BJ a dokončovací metod pomocí konvenčního způsobu výroby je diskutabilní, ale nelze jednoznačně rozhodnout, zda by navýšení nákladů o metody post-processingu vyrovnalo cenovou výhodnost této AT.

Třetí a jako nejvíce perspektivní skupina se jeví PBF, která byla detailněji rozebrána pomocí zástupců SLS, MLS, DMLS. Technologie SLS byla značně nevyhovující a zdaleka nesplňovala požadavky stanovené prací, a proto byla z výběru ihned vyřazena. Naopak zbylí dva zástupci dosahují velmi dobrých výsledků, které byly detailně popsány na konkrétních tiskárnách a tiskových materiálech a vybráni do posledního zhodnocení.

Výsledkem této práce je finální srovnání nejvíce perspektivních metod s požadavky kladenými na tlakovou vířivou tryšku, provedené v kapitole 6 *Výběr vyhovující metod* v Tab. 8, z které plyne, že dva nejvíce potencionální kandidáti pro replikaci jsou dvě výše zmíněné technologie MLS, DMLS, kterým bude věnováno následující shrnutí jimi dosahovaných výsledků.

Navzdory tomu, že žádná z technologií nebyla schopna velmi přesnému požadavku drsnosti povrchu částí trysky $Ra = 0,4 \mu\text{m}$ vyhovět, technologie MLS se této hodnotě nejvíce přiblížila svými výtisky s drsností $Ra = 0,7 \mu\text{m}$. Pomocí MLS lze dosáhnout přesnosti $\pm 5 \mu\text{m}$, která je v porovnání s přesností trysky dostačující. Na základě přiložených fotografií výtisků MLS byla potvrzena možnost tvorby velmi malých přesných otvorů, což se dá považovat za potencionální důkaz schopnosti MLS vytvořit kvalitní tečné tangenciální vtokové otvory tlakové vířivé trysky. Tyto informace byly však získány z experimentálních studií [64, 66] této metody a bohužel nejsou svázány s použitelnou průmyslovou tiskárnou. Zmíněné zdroje neuvádí informace o pevnostních charakteristikách výtisků, avšak potvrzují schopnost MLS tvorby funkčních komponent srovnatelných kvalit s technologií injekčního vstřikování. Závěrem tedy je, že potenciál této metody zůstává otevřen případné experimentální studii, která požadovanou tryšku vyrobí, otestuje a finálně potvrdí její použitelnost.

Druhý zástupce skupiny PBF, který se jeví jako nejlepší kandidát pro výrobu tlakových vířivých trysek, je metoda DMLS v kombinaci s průmyslovou tiskárnou EOS M 290. Při použití tiskového prášku EOS CobaltChrome MP1 lze vytisknout komponenty rychlostí $1,6 \text{ mm}^3/\text{s}$ ($5,1 \text{ cm}^3/\text{h}$) s přesností $\pm 20 \mu\text{m}$, která odpovídá požadavku kladenému na tlakovou vířivou tryšku. Uváděná drsnost povrchu je $Ra = 4 \mu\text{m}$, což je řádově $10\times$ větší než drsnost na výrobním výkresu trysky. Otázkou zůstává nakolik tento faktor ovlivní funkčnost trysky a zda je možné tuto hodnotu snížit pomocí kombinované výroby s konvenčními metodami obrábění, či nikoliv. Pevnostní charakteristiky tiskového materiálu jsou srovnatelné s vlastnostmi trysky v případě modulu pružnosti, který je 200 GPa a mez pevnosti v tahu je dokonce u prášku EOS CobaltChrome MP1 vyšší přibližně o 200 MPa. Tento materiál je schopen prodloužení do lomu o 20 % a uváděná tvrdost podle Rockwella, změřená podle EN ISO 6508-1, je 35–45 HRC.

Jelikož se u zástupce DMLS podařilo nalézt nejvíce konkrétních informací použitelných pro srovnání s konvenčně vyrobenou tlakovou vířivou tryškou, které jsou navíc až na výjimku drsnosti povrchu vyhovující, byla tato technologie vybrána jako finální kandidát pro možnosti

replikace. Tento závěr je hypotetický a výsledek by bylo vhodné experimentálně ověřit, tedy tryšku vyrobit a otestovat v provozu. K tomuto účelu byl pomocí SOLIDWORKS 2016 vytvořen 3D CAD model dvou částí vybrané tlakové vířivé trysky typu simplex, přiložený na DVD na konci práce. Závěrem této práce tedy je, že vše by mělo být přichystáno pro výrobu a následné experimentální potvrzení teoreticky dosažených výsledků, tedy dokončení posledního nepovinného úkolů 6 a úplné naplnění všech stanovených cílů.

Hlavní úkoly zadání byly naplněny v následující kapitolách:

1. Rešerše dostupných metod 3D tisku se zaměřením na jejich možnosti a již realizovaná řešení v oblasti replikace rozstříkovacích trysek (kapitola 2)
2. Popis funkce konkrétního typu rozstříkovací trysky, rešerše k vlivu kvality povrchu, rozměrové a tvarové přesnosti na její funkčnost (kapitola 3)
3. Specifikace požadavků kladených na uvedenou tryšku s upřesněním pro konkrétní aplikaci (kapitola 4)
4. Kritické posouzení metod popsanych v bodu 1 s ohledem na body 2 a 3 (kapitola 2.2 a kapitola 5)
5. a. Výběr nejperspektivnější z dostupných metod (kapitola 6)
b. Příprava výkresové dokumentace dvou částí trysky (kapitola 7)
c. Příprava 3D CAD modelu dvou částí trysky pro její výrobu pomocí 3D tisku (kapitola 7)
6. Výroba, sestavení a vyzkoušení trysky, porovnání se shodnou tryškou vyrobenou klasickou technologií (nepovinný bod — neřešeno)

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *3D printing* [online]. 2018 [vid. 2018-02-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3D_printing&oldid=824959838
- [2] *The Free Beginner's Guide - 3D Printing Industry* [online]. [vid. 2018-02-14]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>
- [3] *Aditivní výroba a 3D tisk vyžadují přesnost na úrovni CNC - 17/02/2014 - Control Engineering Česko* [online]. [vid. 2018-02-16]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/aditivni-vyroba-a-3d-tisk-vyzaduji-presnost-na-urovni-cnc/>
- [4] *Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, 3D Printing, Whats the Difference? : In'Tech Industries | 3D Printing – Rapid Prototyping* [online]. [vid. 2018-02-14]. Dostupné z: <http://www.intechrp.com/rapid-prototyping-rapid-manufacturing-3d-printing-whats-the-difference/>
- [5] What is 3D Printing? The definitive guide. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-14]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing>
- [6] KRASSENSTEIN, Eddie. 3D Printed Aluminum Lattice Cube Weighs Just 3.9g & Holds up to 900lbs (408kg) - Over 100,000 Times Its Weight! *3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing* [online]. 10. prosinec 2014 [vid. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://3dprint.com/29958/3d-printed-aluminum-lattice/>
- [7] Milovníci trojrozměrného tisku slaví průlom v technologii 3D tištěné keramiky. *100+1 zahraniční zajímavost* [online]. 5. leden 2016 [vid. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.stoplusjednicka.cz/milovnici-trojrozmerneho-tisku-slavi-prulom-v-technologie-3d-tistene-keramiky>
- [8] *3D tisk modelů z běžného kancelářského papíru A4* [online]. [vid. 2018-02-25]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/hardware/78-hardware/4719-3d-tisk-modelu-z-bezneho-kancelarskeho-papiru-a4.html>
- [9] Additive Manufacturing Materials: Metals, Thermoplastics, Glass, Medical & Biochemical. *SPI Lasers* [online]. 24. listopad 2015 [vid. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.spilasers.com/application-additive-manufacturing/additive-manufacturing-materials/>
- [10] A Step-by-step Explanation of How 3D Printing Works. *Buzzle* [online]. [vid. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.buzzle.com/articles/how-does3d-printing-work.html>
- [11] *CAD Software | 2D And 3D Computer-Aided Design | Autodesk* [online]. [vid. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/solutions/cad-software>
- [12] The Additive Manufacturing Process. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-11]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process>

- [13] *Reverse engineering | Reverzní inženýrství a aditivní technologie* [online]. [vid. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/reverse-engineering/>
- [14] The 50 best sites to download STL files and 3D printable files. *Aniwaa* [online]. [vid. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/best-sites-download-free-stl-files-3d-models-and-3d-printable-files-3d-printing/>
- [15] 3D Printing STL files: A step-by-step guide. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-stl-files-step-step-guide>
- [16] *Chyby 3D modelů* [online]. [vid. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://www.na3d.cz/blog/chyby-3d-modelu>
- [17] The impact of layer height on a 3D Print. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/impact-layer-height-3d-print>
- [18] *3D tisk-úvod | 14220.cz* [online]. [vid. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-uvod/>
- [19] Supports in 3D Printing: A technology overview. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview>
- [20] JECH, Adam. Příručka pro designéry – MakersLab | 3D tiskárny, 3d tisk Praha. *www.makerslab.cz* [online]. 17. září 2015 [vid. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://www.makerslab.cz/blog/2015/09/prirucka-pro-designery/>
- [21] How does part orientation affect a 3D Print? *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print>
- [22] *ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology* [online]. [vid. 2018-03-31]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en:term:2.1.2>
- [23] LEFEBVRE, Arthur H. a Vincent G. MCDONELL. *Atomization and Sprays, Second Edition*. B.m.: CRC Press, 2017. ISBN 978-1-4987-3626-8.
- [24] HOMEPAGE. *ADMANSOL*. [online]. [vid. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://admansol.fr/en/>
- [25] HOMOLA, Jan. *Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM) » Konstrukter.cz* [online]. [vid. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [26] *SLA/DLP 3D printing | 3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-21]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/3d-printing/sla-dlp>

- [27] Additive Manufacturing Technologies: An Overview. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-11]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview>
- [28] Introduction to SLA 3D Printing. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-21]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- [29] *VAT Photopolymerisation / Additive Manufacturing Research Group / Loughborough University* [online]. [vid. 2018-02-21]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>
- [30] Vat Polymerization. *whiteclouds 3D printing* [online]. [vid. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://ss.whiteclouds.com/3dpedia-index/vat-polymerization>
- [31] *Powder Bed Fusion / Additive Manufacturing Research Group / Loughborough University* [online]. [vid. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- [32] GETTING STARTED -PART 1- 3D printing technologies - overview. *Tripodmaker* [online]. 4. duben 2017 [vid. 2018-02-23]. Dostupné z: <http://www.tripodmaker.com/2017/04/04/types-of-3d-printing/>
- [33] *Micro laser sintering technology to 3D print tiny metal parts* [online]. [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://newatlas.com/micro-laser-sintering-3d-prints-tiny-metal-parts/30115/>
- [34] LAMONICA, Martin. GE Will Make Jet Part with Additive Manufacturing. *MIT Technology Review* [online]. [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/s/513716/additive-manufacturing/>
- [35] NETWORK, 3D Printing Media. GE Reveals How Greg Morris Created the 3D Printed Nozzle for the LEAP Jet Engine. *3D Printing Media Network* [online]. 6. červenec 2017 [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/ge-reveals-greg-morris-created-3d-printed-nozzle-leap-jet-engine/>
- [36] *Material Extrusion / Additive Manufacturing Research Group / Loughborough University* [online]. [vid. 2018-02-21]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>
- [37] Introduction to FDM 3D printing. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-11]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>
- [38] Introduction to Material Jetting 3D Printing. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-22]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing>
- [39] *Material Jetting / Additive Manufacturing Research Group / Loughborough University* [online]. [vid. 2018-02-22]. Dostupné

z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>

- [40] *XJet officially launches NanoParticle Jetting additive manufacturing systems* [online]. [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/xjet-officially-launches-nanoparticle-jetting-additive-manufacturing-systems-123294/>
- [41] *Binder Jetting / Additive Manufacturing Research Group / Loughborough University* [online]. [vid. 2018-02-22]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- [42] Introduction to Binder Jetting 3D printing. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>
- [43] *Directed Energy Deposition / Additive Manufacturing Research Group / Loughborough University* [online]. [vid. 2018-02-22]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
- [44] *Sheet Lamination / Additive Manufacturing Research Group / Loughborough University* [online]. [vid. 2018-04-01]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>
- [45] UPLOADING. *3D Printing Processes - Sheet Lamination (Part 8/8)* [online]. 11. leden 2017 [vid. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.engineersgarage.com/articles/3d-printing-processes-sheet-lamination>
- [46] *Additive Fabrication (Rapid prototyping, tooling)* [online]. [vid. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [47] *maxresdefault.jpg (1280×720)* [online]. [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://i.ytimg.com/vi/gaRPpkxEJL8/maxresdefault.jpg>
- [48] LEFEBVRE, Arthur H. *GAS Turbine Combustion, Second Edition*. B.m.: CRC Press, 1998. ISBN 978-1-56032-673-1.
- [49] JEDELSKY, Jan, Milan MALY, Noé PINTO DEL CORRAL, Graham WIGLEY, Lada JANACKOVA a Miroslav JICHA. Air–liquid interactions in a pressure-swirl spray. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2018, **121**, 788–804. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.003
- [50] TORRE F, La, Sasa KENJERES, Chris KLEIJN a Moerel J.L.P.A. Effects of Wavy Surface Roughness on the Performance of Micronozzles. *Journal of Propulsion and Power* [online]. 2010, **26**, 655–662. Dostupné z: doi:10.2514/1.44828
- [51] LI, Deng, Yong KANG, Xiaochuan WANG, Xiaolong DING a Zhenlong FANG. Effects of nozzle inner surface roughness on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2016, **74**, 444–452. ISSN 0894-1777. Dostupné z: doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.01.009

- [52] RASHAD, M., H. YONG a C. BIN. Study of viscous and frictional losses in pressure swirl atomizers. In: *2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST): 2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)* [online]. 2016, s. 490–496. Dostupné z: doi:10.1109/IBCAST.2016.7429923
- [53] CHINN, Dr John Joss. The Internal Flow Physics of Swirl Atomizer Nozzles. nedatováno, 229.
- [54] CUI, Jiwen, Houhu LAI, Junying LI a Yarui MA. Visualization of internal flow and the effect of orifice geometry on the characteristics of spray and flow field in pressure-swirl atomizers. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2017, **127**, 812–822. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.08.103
- [55] YULE, A. J. a I. R. WIDGER. Swirl atomizers operating at high water pressure. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 1996, **38**(8), 981–999. ISSN 0020-7403. Dostupné z: doi:10.1016/0020-7403(95)00095-X
- [56] X30Cr13 / Stainless Steel / High Alloy Steel / Steel / Ferrous Metals / Metals / Material Categories / Chemical, mechanical, physical and environmental properties of materials / Matbase: the independent online material selection resource [online]. [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.matbase.com/material-categories/metals/ferrous-metals/steel/high-alloy/stainless-steel/material-properties-of-x30cr13.html#properties>
- [57] *1.4028a420b.pdf* [online]. [vid. 2018-05-16]. Dostupné z: http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/1.4028a420b.pdf
- [58] What's the Difference Between SLS and SLM - and Why Care? *RapidMade - 3D Printing, Rapid Prototyping, Additive Manufacturing and Engineering Services* [online]. [vid. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.rapidmade.com/rapidmade-blog/2014/6/30/ycjnxytvt8n85gqutk5wj67cmx4t7>
- [59] *e-mole_003-004-2015-mobile.pdf* [online]. [vid. 2018-02-11]. Dostupné z: http://www.e-mole.cz/system/files/magazine/e-mole_003-004-2015-mobile.pdf
- [60] How to design parts for SLS 3D Printing. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-23]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sls-3d-printing>
- [61] *3D tisk / o3D.cz* [online]. [vid. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/3d-tisk/>
- [62] Introduction to SLS 3D Printing. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-23]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing>
- [63] *Additive MFG .pdf* [online]. [vid. 2018-02-15]. Dostupné z: <http://www.cbpp.uaa.alaska.edu/afef/Additive%20MFG%20.pdf>
- [64] REGENFUß, P, R EBERT, S KLÖTZER, L HARTWIG, H EXNER, Th BRABANT a T PETSCH. INDUSTRIAL LASER MICRO SINTERING. nedatováno, 12.

- [65] The Advantages of 3D Printing. *3D Hubs* [online]. [vid. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing>
- [66] REGENFUSS, Peter, Lars HARTWIG, Sascha KLÖTZER, Robby EBERT a Horst EXNER. Microparts by a Novel Modification of Selective Laser Sintering. nedatováno, 7.
- [67] EXNER, H., M. HORN, A. STREEK, F. ULLMANN, L. HARTWIG, P. REGENFUß a R. EBERT. Laser micro sintering: A new method to generate metal and ceramic parts of high resolution with sub-micrometer powder. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2008, **3**(1), 3–11. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452750801907970
- [68] Additive Manufacturing | Micro 3D Printing | Micro Laser Sintering. *Precipart* [online]. [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.precipart.com/products-capabilities/custom-mechanical-components/micro-3d-printing/>
- [69] OLAKANMI, E. O., R. F. COCHRANE a K. W. DALGARNO. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science* [online]. 2015, **74**, 401–477. ISSN 0079-6425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2015.03.002
- [70] *EOS M 290 - industrial 3D printed parts from metal materials* [online]. [vid. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://www.eos.info/eos-m290>
- [71] *EOS-M-290_Compatibility_material-system_08-16_en.pdf* [online]. [vid. 2018-04-30]. Dostupné z: https://cdn0.scrvt.com/eos/6076007f357fff15/4ad3ccb2bee2/EOS-M-290_Compatibility_material-system_08-16_en.pdf
- [72] *EOS Metal Materials for Additive Manufacturing* [online]. [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.eos.info/material-m>
- [73] *Ti-Ti64_9011-0014_9011-0039_M290_Material_data_sheet_11-17_en.pdf* [online]. [vid. 2018-04-30]. Dostupné z: https://cdn.eos.info/a4eeb73865d54434/5926811b3739/Ti-Ti64_9011-0014_9011-0039_M290_Material_data_sheet_11-17_en.pdf
- [74] *EOS_CobaltChrome_MP1_en.pdf* [online]. [vid. 2018-04-30]. Dostupné z: http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/4b839242298b3d77/721463526ca053889c9784ec989f3c88/EOS_CobaltChrome_MP1_en.pdf
- [75] SAUNDERS, Sarah. New XJet Carmel 1400 Additive Manufacturing System Brings Inkjet-Based Ceramic 3D Printing to Oerlikon in First Global Installation. *3DPrint.com / The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing* [online]. 8. listopad 2017 [vid. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://3dprint.com/193569/xjet-oerlikon-carmel-1400-system/>
- [76] *Carmel-1400-Specs..pdf* [online]. [vid. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://xjet3d.com/wp-content/uploads/2018/04/Carmel-1400-Specs..pdf>
- [77] Technology. *XJET* [online]. [vid. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://xjet3d.com/technology-new/>

- [78] Hot isostatic pressing. *Wikipedia* [online]. 22. únor 2018 [vid. 2018-04-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hot_isostatic_pressing&oldid=826970156
- [79] LOCKWOOD, Anthony J. Binder Jetting 3D Printer Produces Metal Objects. *Digital Engineering* [online]. 25. říjen 2017 [vid. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.digitaleng.news/de/binder-jetting-3d-printer-produces-metal-objects/>
- [80] LOCKWOOD, Anthony J. Editor's Pick: Binder Jetting 3D Printer Produces Metal Objects. *Digital Engineering* [online]. 25. říjen 2017 [vid. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.digitaleng.news/de/editors-pick-binder-jetting-3d-printer-produces-metal-objects/>
- [81] *Digital-Metal-DM-P2500_feb2018_2168HOG_screen.pdf* [online]. [vid. 2018-04-30]. Dostupné z: https://digitalmetal.tech/wp-content/uploads/2018/02/Digital-Metal-DM-P2500_feb2018_2168HOG_screen.pdf
- [82] Digital Metal® DM P2500 3D metal printer. *Digital Metal* [online]. [vid. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://digitalmetal.tech/machines/design-and-function/>
- [83] Digital Metal® improves component functionality. *Digital Metal* [online]. [vid. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://digitalmetal.tech/cases/components/>
- [84] MALÝ, M. Experimentální studie vlastností spreje a funkčnosti malých tlakových vířivých trysek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 84 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Symbol | Veličina | Jednotka |
|-------------------|---|----------|
| E | Modul pružnosti v tahu | [GPa] |
| P | Výkon | [W] |
| p | Tlak | [MPa] |
| Q _m | Hmotnostní průtok | [kg/h] |
| R _a | Střední aritmetická úchylka profilu | [μm] |
| R _e | Mez kluzu v tahu | [MPa] |
| R _m | Mez pevnosti v tahu | [MPa] |
| R _{p0,2} | Smluvní mez kluzu | [MPa] |
| R _z | Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů | [μm] |
| T | Teplota | [°C] |
| t | Čas | [s] |
| v | Rychlost | [m/s] |
| Z | Kontrakce | [%] |

| Zkratka | Význam |
|---------|------------------------------------|
| 2D | Dvourozměrný |
| 3D | Trojrozměrný |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| AM | Additive manufacturing |
| AT | Aditivní technologie |
| Atd. | A tak dále |
| BJ | Binder Jetting |
| CAD | Computer aided design |
| CDLP | Continuous Direct Light Processing |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| CFM | Commercial Fan Motor |
| CNC | Počítačové číslicové řízení |
| DED | Direct Energy Deposition |
| DLP | Direct Light Processing |
| DMLS | Direct Metal Laser Sintering |
| DOD | Drop-On-Demand |
| DVD | Digital Versatile Disk |
| EBAM | Electron Beam Additive Manufacture |
| EBM | Electron Beam Melting |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| HRB | Tvrdost podle Rockwella |
| HRC | Tvrdost podle Rockwella |

| | |
|-------|--------------------------------------|
| HV | Tvrдост podle Vickerse |
| ISO | International Standards Organization |
| LEAP | Leading Edge Aviation Propulsion |
| LENS | Laser Engineered Net Shape |
| LOM | Laminated object manufacturing |
| ME | Material Extrusion |
| Min. | Minimálně |
| MJ | Material Jetting |
| MJF | Multi Jet Fusion |
| MLS | Micro laser sintering |
| Např. | Například |
| NPJ | Nano Particle jetting |
| Obr. | Obrázek |
| PA 12 | Polyamid 12 |
| PBF | Powder Bed Fusion |
| PEEK | Polyetheretherketon |
| PLA | Polylactid acid |
| PVA | Polyvinylalkohol |
| RP | Rapid prototyping |
| SL | Sheet Lamination |
| SLA | Stereolithography |
| SLM | Selective Laser Melting |
| SLS | Selective Laser Sintering |
| Tab. | Tabulka |
| Tzn. | To znamená |
| Tzv. | Takzvaný |
| UAM | Ultrasonic additive manufacturing |
| UV | Ultrafialový |
| VP | Vat photopolymerization |

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 12 Příklad možností AT — 4 g výtisk z Al, který unese závaží o hmotnosti 408 kg [6]
- Obr. 13 Přesnost výtisku v závislosti na tvaru (metoda aproximuje tvar pomocí vrstev) [18]
- Obr. 14 Heterogenní mechanické vlastnosti při FDM tisku — přizpůsobeno z [21]
- Obr. 15 Základní rozdělení skupin AT — přizpůsobeno z [24]
- Obr. 16 Princip tisku SLA — přizpůsobeno z [30]
- Obr. 17 Princip tisku technologie SLS — přizpůsobeno z [32]
- Obr. 18 Princip tisku ME — přizpůsobeno z [32]
- Obr. 19 Princip tisku MJ — přizpůsobeno z [32]
- Obr. 20 Princip tisku technologie BJ — přizpůsobeno z [32]
- Obr. 21 Princip fungování Laser Engineered Net Shape — přizpůsobeno z [32]
- Obr. 22 Princip tisku UAM — přizpůsobeno z [32]
- Obr. 52 Před (vpravo) a po (vlevo) obroušení stěn výtisku [47]
- Obr. 13 Tlaková vířivá tryska typu simplex — přizpůsobeno z [49]
- Obr. 14 Porovnání přesného výstupního otvoru trysky s vyrobeným [03]
- Obr. 16 Příklad možností MLS [64]
- Obr. 17 Výsledky dosažené pomocí NPJ [75]
- Obr. 18 Demonstrační příklad možností BJ v kombinaci s DM P2500 [83]

SEZNAM TABULEK

| | |
|--------|---|
| Tab. 1 | Pevnostní charakteristiky materiálů PA 12 a Nylon 12 [62] |
| Tab. 2 | Pevnostní charakteristiky EOS Titanium Ti64 — přizpůsobeno z [73] |
| Tab. 3 | Pevnostní charakteristiky EOS CoobaltChrome MP1 bez dalšího zpracování — přizpůsobeno z [74] |
| Tab. 4 | Pevnostní charakteristiky EOS CoobaltChrome MP1 tepelně zpracovaného — přizpůsobeno z [74] |
| Tab. 5 | Porovnání BJ při použití dokončovacích metod s DMLS/SLM pro ocel 316L — přizpůsobeno z [42] |
| Tab. 6 | Obecně dosahované výsledky BJ — přizpůsobeno z [42] |
| Tab. 7 | Mechanické vlastnosti materiálů pro DM P2500 — přizpůsobeno z [81] |
| Tab. 8 | Porovnání konvenčně vyrobené trysky s možnostmi jednotlivých AT |

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|-----------|---|
| Příloha 1 | Výkres VÍKO TRYSKY |
| Příloha 2 | Výkres DRUHÁ ČÁST TRYSKY |
| Příloha 3 | 3D CAD model dvou částí trysky nahraný na DVD |